



Estudo e teste das sequências de modelos em linhas mistas de montagem

João Pedro Martins Brandão de Almeida

Projecto de Dissertação do MIEIG 2009/2010

Orientador na FEUP: Prof. José Barros Basto



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão

2010-09-14

Resumo

No contexto económico actual, a competitividade das empresas surge como um factor determinante à sua sobrevivência. Focalizando a atenção no plano industrial esta competitividade advém, numa primeira análise, dos índices de produtividade atingidos e da optimização da utilização de recursos, incluindo os de natureza financeira.

No âmbito desta problemática e considerando um cenário industrial constituído por linhas de montagem de elevada cadência produtiva, a maximização da sua eficiência assume-se como uma prioridade. Surge então uma questão fulcral: evitar as paragens não programadas das linhas, que ocasionam elevadas perdas de produtividade pela inoperacionalidade dos recursos associados (equipamentos/mão de obra).

Por outro lado, as exigências do mercado que apontam para a necessidade de uma maior diversidade na gama de produtos contrastando com o prazo de entrega que se pretende cada vez mais curto, realçam a importância das linhas mistas de montagem na medida em que estas permitem uma grande flexibilidade.

As bases deste trabalho estão encontradas: Reduzir paragens em linhas mistas de montagem sem recurso a grandes investimentos.

Neste sentido, seleccionou-se uma temática bastante popular nas linhas mistas de montagem: a escolha da sequência pela qual são introduzidos os diferentes modelos na linha (sequenciação). Uma melhoria relacionada com esta temática não requer alterações de base a instalações, processos ou produtos tornando-se viável a curto prazo pois relaciona-se com a forma de jogar com as características (tempos de processamento) de cada modelo a montar.

Começou-se por estudar os elementos influentes na sequenciação, avançando-se depois para a criação de um aplicativo informático (simulador) que garantisse ao mesmo tempo flexibilidade de aplicação e facilidade de utilização. Flexibilidade de aplicação para possibilitar ao utilizador conseguir definir os parâmetros inerentes à sua linha de montagem. De fácil utilização para que seja realmente um auxílio à decisão, permitindo introduzir e testar sequências obtendo dados concretos sobre as paragens que irão provocar. Finalmente, o desenvolvimento de diversos procedimentos com vista a redução dos tempos de paragem que foram testadas nesse mesmo simulador.

No final deste projecto ficou bem patente a importância da sequência, sobretudo através da análise aos resultados obtidos com a implementação de heurísticas que não exigem grande complexidade de utilização. Um desenvolvimento futuro quer com a automatização das heurísticas quer com a definição correcta do papel de operador chave poderá conduzir a resultados ainda mais favoráveis.

“Study and test of models sequences in Mixed Model Assembly Lines”

Abstract

In the current economic environment, competitiveness among companies has become a fundamental factor for their survival. Focusing on an industrial level, this competitiveness arises, at a first glance, from the productivity indices attained and the optimized use of resources, including those of a financial nature.

As a result of this situation, and considering an industrial scenario consisting of high-paced assembly lines, maximizing its efficiency is considered a priority. Thus the emergence of a crucial issue: avoid non-programmed line stoppages that lead to high productivity losses due to the “non-operational” status of the associated resources (equipment/labour).

On the other hand, the market demands that show a need for greater product range diversity in contrast with the delivery time which is expected to be shorter and shorter, highlight the importance of mixed assembly lines as these allow for greater flexibility.

The bases of this project are: to reduce stoppages in mixed assembly lines without resorting to big investments.

Subsequently, a theme, very common to mixed assembly lines, was selected: the choice of sequence used to introduce the different models into the line (sequencing). An improvement related to this topic does not require changes made to facilities, processes or products which make it feasible on a short term basis as it allows us to “play around” with the characteristics of each model to be assembled.

First, the elements that influence the sequencing were studied and then the next step was to create a computer application (simulator) that would guarantee flexibility and at the same time make it user friendly. Application flexibility allows the user to define assembly line parameters and, user friendly, to be of real help in the decision-making process allowing the introduction and testing the sequences in order to obtain concrete data about the non-programmed stoppages that they will result in. Finally, the development of several procedures aiming to reduce the stoppage times then tested using this simulator.

At the end of this project there was no doubt as to the importance of sequencing, especially after analyzing the results obtained from the implementation of easy-to-use heuristics. A future development, of either the automation of heuristics or the correct definition of the key operator role can lead to even better results.

Agradecimentos

Quero aqui expressar os meus agradecimentos a algumas pessoas que muito me apoiaram durante o decorrer deste projecto:

Ao Prof. José Barros Basto pela dedicação, empenho e disponibilidade que sempre demonstrou desde o primeiro ao último dia.

À minha família mais próxima e à minha namorada por todo o suporte que me permitiu transformar os momentos menos bons em motivação que me fez conseguir chegar a bom porto.

Índice de Conteúdos

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 O Projecto	1
1.2 Metodologia a seguir	3
1.3 Estudo e Desenvolvimento do simulador NO MORE STOPS!.....	3
1.4 Temas Abordados e sua Organização	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Linha de Montagem	5
2.2 Operador Chave	12
3. CONCEITOS IMPORTANTES NUMA LINHA MISTA DE MONTAGEM	13
3.1 Espaço físico	13
3.2 Tempo definido para produção	17
3.3 Definição da procura	18
3.4 Velocidade da linha	18
3.5 Operações/Processos de montagem	19
3.6 Cargas de Trabalho	21
4. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	23
4.1 Introdução	23
4.2 Problemática da sequenciação	24
5. ABORDAGEM DO PROBLEMA	25
5.1 Escolha do software de base do Simulador	25
5.2 Inserção dos factores no Simulador	26
5.3 Criação dos formulários.....	26
5.4 Programação do simulador	27
5.5 Criação e teste de heurísticas de melhoria	32
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	53
6.1 Conclusões	53
6.2 Perspectivas Futuras	54
REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	55
ANEXO A : FIGURAS E DESCRIÇÕES DOS FORMULÁRIOS DO APLICATIVO	57
ANEXO B : TABELAS RELATIVAS AO TESTE 1.....	65
ANEXO C : TABELAS RELATIVAS AO TESTE 2.....	66

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama ilustrativo das razões para o aumento das variantes de produto simultaneamente em linha	2
Figura 2 - Diagrama que ilustra de forma resumida a importância da sequenciação	2
Figura 3 - Princípio inerente a uma linha de montagem dedicada a um único produto (Scholl, 1999)	6
Figura 4 - Princípio inerente a uma linha múltipla de montagem (Scholl, 1999)	6
Figura 5 - Princípio inerente a uma linha mista de montagem (Scholl, 1999)	7
Figura 6 - Exemplo de uma sequência de produtos para montagem	9
Figura 7 - Designação das estações baseada na sua posição	13
Figura 8 - Dimensões de uma estação numa linha de montagem	14
Figura 9 - Zonas de trabalho dentro da estação.	15
Figura 10 - Esquema resumo dos vários dados de base à simulação	26
Figura 11 - Exemplo de um gráfico de cargas.	31
Figura 12 - Imagem do menu principal, com anotações.	57
Figura 13 - Imagem do menu modelos a produzir, com anotações.	58
Figura 14 - Imagem do menu definir a procura, com anotações.	59
Figura 15 - Imagem do menu definir tempo de trabalho e paragens, com anotações.	60
Figura 16 - Imagem do menu definir cargas de trabalho, com anotações.	61
Figura 17 - Imagem do menu definição das sequências, com anotações.	62
Figura 18 - Imagem do menu confirmar dados, com anotações.	63
Figura 19 - Imagem do menu correr simulação, com anotações.	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resumo dos vários níveis de cargas e cor que os representa.	21
Tabela 2 - Excerto do elemento 1 de uma simulação	28
Tabela 3 - Exemplo de uma descrição de paragens.	29
Tabela 4 - Exemplo de tabela resumo de paragens.	30
Tabela 5 - Exemplo de tabela de paragens por posto de trabalho.	30
Tabela 6 - Legenda relativa aos tipos de paragem.....	30
Tabela 7 - Modelos e respectivas cargas médias de trabalho para o teste.	33
Tabela 8 - Estações e postos de trabalhos para o teste.	33
Tabela 9 - Peso de cada tipo de operações na carga de trabalho do posto.	34
Tabela 10 - Número e tempos de paragens programadas	34
Tabela 11 - Procura para cada um dos modelos.....	34
Tabela 12 - Método para obtenção da sequência por ordem alfabética.....	35
Tabela 13 - Detalhes sobre as paragens divididos por postos de trabalho (1ª simulação)	36
Tabela 14 - Peso de cada posto de trabalho no total de paragens.....	36
Tabela 15 - Cargas de trabalho relativas ao posto 5E.	37
Tabela 16 - Obtenção da 2ª sequência pelo procedimento 1.....	37
Tabela 17 - Detalhes sobre as paragens divididos por postos de trabalho (2ª simulação)	38
Tabela 18 - Comparação entre 1ª e 2ª sequência em termos de paragens.....	38
Tabela 19 - Comparação entre a 1ª e 2ª sequência para cada posto de trabalho.....	39
Tabela 20 - Explicação da ineficácia da junção de modelos dois a dois.....	39
Tabela 21 - Ordens de carga do posto de trabalho 5E.....	39
Tabela 22 - Obtenção da 3ª sequência pelo procedimento 2.....	40
Tabela 23 - Detalhes sobre as paragens do tipo 4 para cada posto de trabalho (3ª simulação) 40	40
Tabela 24 - Comparação entre as 3 sequências em termos de paragens.....	40
Tabela 25 - Comparação entre as 3 sequências para cada posto de trabalho.	41
Tabela 26 – Ordens de cargas para os conjuntos definidos no procedimento 2.....	42
Tabela 27 - Obtenção da 4ª sequência pelo procedimento 2.1.....	42
Tabela 28 - Comparação entre as 4 sequências em termos de paragens do tipo 4.	42
Tabela 29 - Comparação entre as 4 sequências para cada posto de trabalho.	43
Tabela 30 - Cargas médias e paragens do tipo 4 referentes à 1ª simulação.	43
Tabela 31 - Ordem de cargas para os modelos no posto de trabalho 3T	44
Tabela 32 - Obtenção da 5ª sequência pelo procedimento 3.....	44
Tabela 33 - Comparação entre as melhores sequências em termos de paragens do tipo 4.	44
Tabela 34 - Comparação entre as 4 últimas sequências para cada posto de trabalho.....	45
Tabela 35 - Categorias dos modelos para o teste 2.	46
Tabela 36 - Versões para o modelo Robusty.....	46
Tabela 37 - Versões para o modelo Sporty.	46
Tabela 38 - Versões para o modelo Family.	46
Tabela 39 - Versões para o modelo City.....	47
Tabela 40 - Tempo para produção no teste 2.	47
Tabela 41 – Operações para o posto 9E.....	48
Tabela 42 - Carga e tempo de processamento para cada versão no posto 9E.	48

Tabela 43 - Correspondência modelo - versão.	49
Tabela 44 - Obtenção da 1ª sequência (2º teste).	49
Tabela 45 - Paragens do tipo 4 na 1ª simulação (teste 2).....	49
Tabela 46 - Ordens de carga do posto de trabalho 4F (teste 2).....	50
Tabela 47 - Obtenção da 2ª sequência pelo procedimento 3 (teste 2)	50
Tabela 48 - Comparação entre as 2 sequências em termos de paragens do tipo 4.	51
Tabela 49 - Legenda das anotações da figura 13	57
Tabela 50 - Legenda das anotações da figura 14	58
Tabela 51 - Legenda das anotações da figura 15	59
Tabela 52 - Legenda das anotações da figura 16	60
Tabela 53 - Legenda das anotações da figura 17.	61
Tabela 54 - Legenda das anotações da figura 18.	62
Tabela 55 - Legenda das anotações da figura 19.	63
Tabela 56 - Legenda das anotações da figura 20.	64
Tabela 57 - Tempos de processamento e cargas de trabalho para todos os postos (teste 1)....	65
Tabela 58 - Tempos de processamento, cargas e ordens de carga para o posto 3T	65
Tabela 59 - Descrição das operações definidas para cada posto de trabalho (teste 2).....	66
Tabela 60 - Procura para cada versão no teste 2.....	68
Tabela 61 - Cargas e tempos de process. para cada versão e posto de trabalho (teste 2).....	69
Tabela 62 - Dados relativos às paragens para cada posto de trabalho (teste 2 - 1ª sequência) 70	
Tabela 63 - Tempos de processamento, cargas e ordem de cargas para o posto 4F.	71
Tabela 64 - Dados relativos às paragens para cada posto de trabalho (teste 2 - 2ª sequência) 72	

1. Introdução

O projecto aqui apresentado surge no âmbito da dissertação final relativa ao Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão, a qual tem como principal objectivo contextualizar o aluno finalista com a vida profissional.

Neste contexto, este projecto visa essencialmente ser um contributo válido para a realidade industrial a que reporta, (mediante a apresentação de uma solução simples e pouco onerosa para o problema identificado) e simultaneamente permitir a transição do meio académico para a realidade empresarial, possibilitando o enriquecimento pessoal e profissional.

No ambiente de competitividade industrial que actualmente se vive, a melhoria do processo produtivo visando uma maior eficiência e produtividade, deverá ser encarada como uma prioridade. Contudo, o aumento de produtividade é normalmente sinónimo de investimento, cujo retorno deve ser garantido em tempo útil, sob pena de não surtir o efeito desejado.

1.1 O Projecto

O objectivo principal deste projecto é garantir uma melhoria significativa na produtividade das linhas de montagem sem, no entanto, exigir avultados custos de implementação. O propósito não será efectuar grandes alterações na linha de montagem, dado que o foco deste trabalho será a forma de inserir o produto na linha e não o modo como este é processado nessa mesma linha.

Numa primeira análise, um bom balanceamento seria a base de uma linha de montagem eficiente. Com efeito, o balanceamento não descreve apenas a sequência de operações, que permite garantir a obtenção do produto final, mas deve assegurar também que este produto chega ao seu destino no menor tempo possível e com a qualidade desejada. Este projecto embora esteja relacionado com esta temática, encara a produtividade de uma linha de montagem de um modo diferente, distanciando-se do balanceamento de linhas. Assim, a alteração de cargas ou sequências de trabalho e *layouts* dos postos não será abordada. Parte-se então do princípio que a linha teve por base um balanceamento rigoroso, cujos resultados serão utilizados no projecto.

O objecto de estudo será então a sequenciação. O termo sequenciação só faz sentido caso possam existir diferentes modelos a serem montados. Este facto reduz o raio de acção deste projecto. Apenas nas linhas de montagem, designadas por lista mistas ou multi-modelo - que provém do inglês *mixed model assembly line* (MMAL) - poderão coexistir para montagem, vários modelos ou variantes do mesmo modelo.

Tendo em conta o mercado actual, em que a procura é cada vez mais heterogénea e as empresas procuram, por sua vez, diversificar a gama de produtos com vista a maximizar a sua

quota de mercado, a tendência será para que aumente de forma galopante o número de variantes em paralelo nas linhas de montagem.



Figura 1 - Diagrama ilustrativo das razões para o aumento das variantes de produto simultaneamente em linha

O problema base deste projecto será então:

- Como lidar com a variedade de produtos em linha?

Partindo da variedade, chega-se rapidamente a outros pontos importantes para as linhas mistas, como as discrepâncias do produto e consequentemente do processo de montagem para cada um deles.

Em termos de balanceamento, todas estas discrepâncias originam normalmente dificuldades para encontrar um compromisso entre todos os modelos/variantes. Mesmo um correcto balanceamento não garantirá jamais uma carga de trabalho idêntica para todos os modelos num determinado posto de trabalho. No sentido de resolver esta problemática surge então a sequenciação.

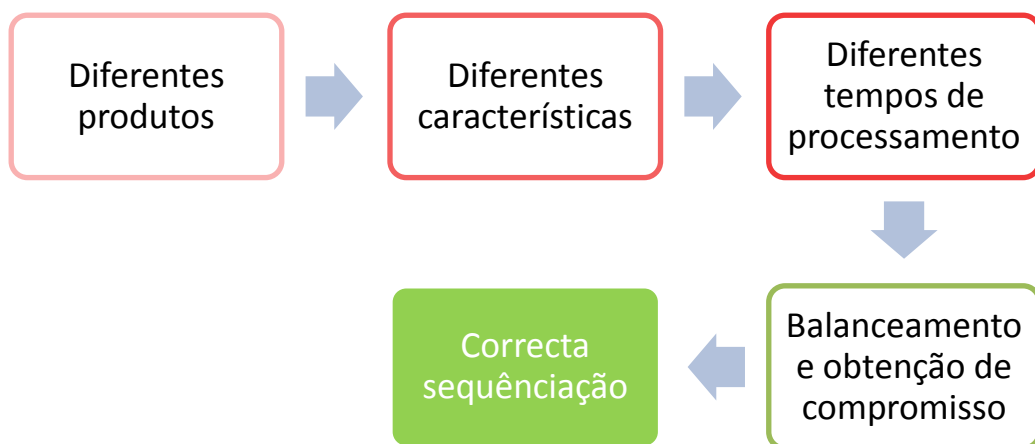


Figura 2 - Diagrama que ilustra de forma resumida a importância da sequenciação

A sequenciação jogará com a forma de lançar os diferentes modelos/variantes em linha, para tentar garantir, dentro dos possíveis, uma “suavização” da carga de trabalho para cada

operador. Uma sequência sem picos de trabalho garantirá não só reduzir as paragens de linha como permitirá maior disponibilidade do operador para outros aspectos como a qualidade, um desempenho mais ergonómico ou maior bem-estar.

O desenvolvimento de um simulador que sirva de apoio ao decisor, neste caso ao responsável de produção será a meta a assegurar, com o presente projecto.

1.2 Metodologia a seguir

Em qualquer projecto que vise implementar melhorias, há que, em primeiro lugar, analisar a situação existente, como seja:

- Aspectos principais de uma linha de montagem, como número de estações ou tamanho das mesmas;
- Características inerentes às diferentes operações, tentando catalogá-las de acordo com uma característica padrão;
- Discrepâncias de produto, para perceber o que realmente distingue os produtos entre si;

De seguida é importante escolher a melhor forma para introdução e gestão dos dados. Pretende-se que a ferramenta a adoptar seja simples e de fácil manuseamento para o utilizador, pois de outra forma será esquecida ou ignorada.

A fase seguinte será passo a passo ir implementando as características que se pretendem para a ferramenta e ir testando a existência de erros ou limitações. Em paralelo vai-se melhorar sempre que possível a forma como os resultados são apresentados ao utilizador para que sejam claros e objectivos.

Com a base estabelecida podemos criar então o simulador que permita analisar a sequência pretendida pelo utilizador e dar *feedback* para que este se possa servir dela.

Por fim, pretende-se um algoritmo que vá ainda mais além e permita melhorar, se possível, a sequência introduzida pelo utilizador.

1.3 Estudo e Desenvolvimento do simulador NO MORE STOPS!

O presente projecto tem então como principal constituinte o simulador “NO MORE STOPS!”.

Num primeiro momento, foi estudada a hipótese de utilizar um software com vertente de simulação gráfica (ex: Arena) mas, após uma análise custo – benefício, concluiu-se que o ganho que poderia ser obtido em termos de grafismos da simulação não compensaria outros factores como o custo ou a complexidade de utilização de um software deste género. Partiu-se então para outras opções.

A abordagem ao problema teve então em consideração o facto de se pretender que este aplicativo/ferramenta fosse algo flexível e com um custo de utilização baixo. Neste contexto, optou-se pelo Microsoft Excel (versão 2007), um software muito popular e que pelo facto de estar ao alcance de quase todos, não representaria um custo extra para o utilizador. Por outro lado, o grau de implementação do MS Excel nas empresas garantiria que a maioria dos utilizadores estaria apta para trabalhar com o simulador sem nenhum tipo de formação.

Dentro do MS Excel utilizou-se a ferramenta de programação VBA – *Visual Basic for Applications* - para automatizar os diferentes processos inerentes ao simulador.

1.4 Temas Abordados e sua Organização

A dissertação apresenta-se dividida em quatro partes principais a que correspondem os quatro capítulos que se seguem:

- Capítulo 2 - Compreende a análise científica do projecto também denominada de análise da literatura, na qual, como forma de enquadrar o projecto, serão abordados os conceitos inerentes ao mesmo.
- Capítulo 3 - Focar-se-ão de uma forma ordenada também todos os temas ou conceitos que poderão levar ao desenvolver da solução, nomeadamente à criação do simulador (aplicativo informático);
- Capítulo 4 - Apresenta a explicação do problema a tratar e o seu enquadramento no ambiente industrial;
- Capítulo 5 - Apresenta a descrição da solução encontrada, com principal detalhe na forma de abordagem do problema. Contêm também uma explicação sobre a criação do simulador/aplicativo e das suas funções/capacidades;
- Capítulo 6 - Apresenta as conclusões e indicações para evolução futura;

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Linha de Montagem

A linha de montagem surgiu em 1913, na indústria automóvel, por ideia de Henry Ford que viu na produção em série a melhor alternativa para que o seu Ford modelo T pudesse estar ao alcance de mais do que a uma minoria do mercado. Nessa altura Ford percebeu que estandardizar o processo de montagem e impor um ritmo lhe permitiria reduzir significativamente o tempo e consequentemente o custo de fabricação do produto.

Desde então, as linhas de montagem têm sofrido grandes alterações com vista a acompanhar as crescentes necessidades de mercado. Hoje em dia, são frequentes também em outros ramos de indústrias de produção em massa como as de componentes electrónicos, mobiliários ou vestuário. (Pan & Sarker, 2001)

Uma linha de montagem pode ser descrita como um espaço físico no qual se desenrola uma sequência de processos ou operações que permitem transformar, pela montagem de diversos componentes, uma matéria-prima ou produto de base num produto final. A inclusão dos diferentes constituintes faz-se ao longo da linha de montagem e a sequência de processos é definida pela distribuição destes pelos postos de trabalho existentes. O produto movimenta-se através da linha por acção de um transportador (por exemplo *conveyor* ou tapete). (Baybars, 1986)

Uma linha de montagem pode ser caracterizada mediante a variedade de produtos que permite processar. Existem então três tipos principais (Scholl, 1999):

- **Linha dedicada a um único produto** (*single model assembly line*);
- **Linha dedicada a múltiplos produtos** (*batch model assembly line*);
- **Linha mista** (*mixed model assembly line*).

2.1.1 Linha dedicada a um único produto – *Single model assembly line*

Uma linha de montagem dedicada é, como o próprio nome indica, destinada à produção em massa de uma única referência de produto. É desenhada exclusivamente de acordo com o produto em causa apresentando uma flexibilidade muito limitada. (Scholl, 1999). Neste tipo de linhas o correcto balanceamento deverá por si só garantir uma fluidez na linha de montagem visto que sendo os produtos iguais a divisão dos processos pelas estações terá um menor grau de complexidade. (Håkansson, Skoog & Eriksson, 2010)

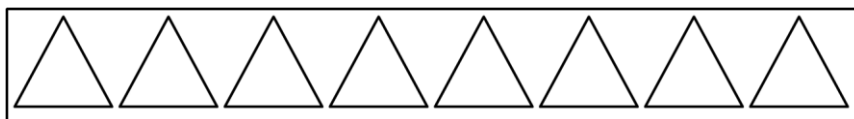


Figura 3 - Princípio inerente a uma linha de montagem dedicada a um único produto (Scholl, 1999)

2.1.2 Linha dedicada a múltiplos produtos - *Batch model assembly line*

Ao inverso da anterior, uma linha dedicada a múltiplos produtos está, como o próprio nome indica, preparada para a montagem de diferentes referências de produtos. No entanto, embora seja bastante mais flexível, não permite que várias referências estejam em linha em simultâneo. Por exemplo, a linha pode ser responsável pela montagem do produto A e B mas num dado intervalo temporal (turno, dia, semana ou mês de trabalho) está a produzir apenas A ou apenas B. Pode então dizer-se que produz por lotes, lotes esses de tamanho variável de acordo com o período de produção atribuído (Boysen, Fliedner & Scholl, 2008). O principal problema com que se deparam os responsáveis deste tipo de linhas tem a ver com o tamanho dos lotes e a ordem pelos quais serão introduzidos em linha. (Scholl, 1999)

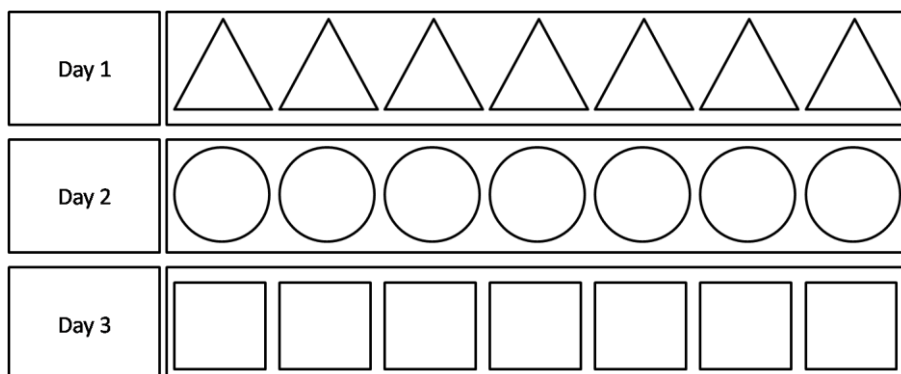


Figura 4 - Princípio inerente a uma linha de montagem dedicada a múltiplos produtos (Scholl, 1999)

2.1.3 Linha mista - *Mixed model assembly line*

Tem como ponto comum à linha múltipla a capacidade para processar diversas referências de produtos sendo que a principal diferença reside na disponibilidade da linha mista para o fazer em simultâneo. Ou seja, as suas características permitem que estes produtos coexistam em simultâneo na linha, garantindo a montagem dos mesmos no período temporal determinado. Este tipo de linha poderá, no limite, produzir em lotes de apenas uma unidade, pois numa sequência de produtos lançados em linha todos eles podem ser distintos.



Figura 5 - Princípio inerente a uma linha mista de montagem (Scholl, 1999)

Mesmo sendo um tipo de linha bastante mais flexível que os dois outros tipos, as referências de produtos têm geralmente uma base comum sendo a diferenciação feita pela presença ou não de componentes opcionais. As linhas mistas devem pois garantir a flexibilidade, quer do operador quer de ferramentas, como forma de responderem às diferentes características inerentes a cada produto. Produtos com características bastante díspares podem seguir-se nestas linhas de montagem e deverá ser garantido um desempenho semelhante para qualquer um deles. (Scholl, 1999)

Existem algumas considerações a ter em conta quanto ao funcionamento ideal de uma linha mista de montagem (Boysen, Fliedner & Scholl, 2009). Então, neste tipo de linhas:

- Todas as tarefas estão devidamente especificadas (para cada modelo a produzir) e previamente atribuídas a um posto de trabalho/operador;
- Os tempos de setup são muito reduzidos ou mesmo nulos;
- A velocidade do transportador é constante ao longo de toda a linha;
- Não existem buffers entre as estações;
- A procura é conhecida para a janela de planeamento e não está sujeita a alterações de última hora;
- O stock dos vários componentes está garantido para qualquer dos produtos em linha;
- Não ocorrem avarias nas máquinas ou ferramentas;
- Não existe absentismo ou diferenças de produtividade entre operadores.

Face ao acima exposto, pode constatar-se que existem muitos factores que podem influenciar o óptimo funcionamento de uma linha mista. O planeamento deve ser pois elaborado tendo em conta diferentes horizontes temporais. A médio ou longo prazo, é importante conseguir uma instalação correcta da linha e uma distribuição eficaz do trabalho entre os diferentes postos e estações. No curto prazo, a sequenciação da produção tem como objectivo garantir uma utilização eficiente dos recursos e minimizar as flutuações de carga de trabalho. (Håkansson, Skoog & Eriksson, 2010)

O balanceamento das estações e a sequência produtiva a adoptar são os pontos-chave do correcto funcionamento de uma linha mista de montagem. Se no caso do balanceamento o estudo deve ser feito *a priori* com vista a uma aplicação a médio ou longo prazo (Becker & Scholl, A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, 2006), já a sequenciação tem de responder no momento pois a procura varia (até diariamente) de acordo com as pretensões do mercado alvo. (Bard, Shtub, & Joshi, 1994)

2.1.4 Balanceamento de linha mista - Médio ou longo prazo

O balanceamento de uma linha de montagem tem como meta principal: distribuir, de forma o mais uniforme possível, as operações de um dado modelo pelas estações de trabalho. Tal distribuição denomina-se de balanceamento horizontal. (Becker & Scholl, 2006). O balanceamento está normalmente mais dependente das decisões estratégicas relacionadas com a implantação da linha do que dos problemas operacionais propriamente ditos. As distribuições do trabalho não podem ter em conta apenas a fluência do produto em linhas mas também outras restrições como a sua implicação para o operador, nomeadamente em termos de ergonomia (Håkansson, Skoog & Eriksson, 2010). Por exemplo, na indústria automóvel, não se pode esperar que um operador que executa funções por baixo do carro ou outro que esteja encolhido dentro do mesmo tenham o mesmo rendimento do que alguém que trabalha numa posição ergonómica ideal.

Segundo (Boysen, Flidner & Scholl, 2008) existem duas abordagens quanto aos problemas de balanceamento de linhas mistas:

- A primeira solução seria tentar reduzir o problema a um balanceamento de linha simples, ou seja, através de suposições e generalizações tentar englobar vários modelos criando um padrão. Esse padrão seria a base de uma distribuição de tarefas claramente mais simplificada.
- A segunda solução seria ir mais fundo no problema, evitando as generalizações ou valores médios entre modelos que originarão sempre uma certa ineficiência devido a tratar-se do balanceamento de modelos diferentes como se fossem apenas um com características intermédias entre eles. A proposta é de recorrer a métodos matemáticos e heurísticas de forma a conseguir um balanceamento o mais correcto possível.

2.1.5 Sequenciação – Curto Prazo

A sequência de produção representa a ordem pela qual os produtos evoluem ao longo da linha produtiva. Se nas linhas do tipo simples ou múltiplas este termo não tem significado visto que todos os produtos são iguais, nas linhas mistas a sequência pode ser um factor determinante para a produtividade.

Uma correcta sequenciação é um factor determinante para o desempenho de uma linha mista, uma vez que coexistem produtos diferentes numa mesma linha de montagem. Diferentes produtos representam diferentes exigências para o operador. É importante então balancear o trabalho para evitar a sobrecarga do posto de trabalho e consequente paragem da linha produtiva. (Boysen, Flidner & Scholl, 2009).

Posição n	...	Posição 8	Posição 7	Posição 6	Posição 5	Posição 4	Posição 3	Posição 2	Posição 1
Produto		Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
A	...	C	A	B	D	C	A	D	B

Figura 6 - Exemplo de uma sequência de produtos para montagem

De acordo com a literatura (Bard, Shtub & Joshi, 1994), a sequenciação pode ser feita tendo em vista diferentes objectivos. Existem então duas medidas principais para a sequenciação:

- **A minimização de tempo de paragens** que pode ser vista como uma medida do desempenho interno. A produtividade não estará garantida enquanto existirem consecutivas interrupções do fluxo normal de montagem. Para garantir um contínuo fluxo produtivo deverão coexistir em partes iguais produtos com maior e menor complexidade de forma a uniformizar o melhor possível a carga de trabalho ao longo de toda a linha.
- **A adaptação da produção à procura** que trata da vertente “satisfação do cliente”. Não tem como base avaliar o desempenho da linha de montagem mas sim garantir que a procura está satisfeita dentro dos parâmetros impostos pelo mercado (tempo e qualidade). Por outro lado e ainda dentro do ambiente de produção *Just-in-time* avalia-se também a calendarização, não só da data de entrega do produto final como também a chegada programada de componentes. Os componentes para um dado modelo devem chegar apenas na altura em que são necessários.

Dentro da sequenciação existem, segundo a literatura, três formas diferentes de abordar o problema tendo em conta também os dois objectivos acima descritos. São elas:

- Sequenciação baseada em múltiplos modelos (*Mixed-model sequencing*)
- Sequenciação baseada na indústria automóvel (*Car sequencing*)
- Sequenciação baseada no princípio do *just in time* (*Level Scheduling*)

a) Sequenciação baseada em múltiplos modelos (*Mixed-model sequencing*)

Esta abordagem como o próprio nome indica baseia-se nas características dos diferentes modelos que podem coexistir numa linha mista. Tem como objectivo principal evitar a sobrecarga de trabalho nas estações e consequentemente as paragens de linha. O método a seguir é basicamente encontrar uma sequência na qual modelos com tempos de processamento longos e curtos alternem entre si. (Boysen, Flidner & Scholl, 2009)

Embora em horizontes temporais diferentes, a sequenciação depende da qualidade obtida aquando do balanceamento. Quanto melhor o balanceamento horizontal que for conseguido, mais hipóteses existem de se obter uma sequenciação com bons resultados

(Scholl, 1999) .O balanceamento é responsável pelos dados (*inputs*) dos quais parte qualquer sequenciação. O número de estações e o tempo de processamento de cada modelo em cada posto de trabalho definidos no balanceamento são o ponto de partida. (Scholl, 1999).

Explicando mais detalhadamente esta abordagem, um tempo de processamento médio é calculado. Depois os modelos são classificados em altos ou baixos segundo apresentam tempo de processamento superior ou inferior à média, respectivamente. Se vários modelos classificados como altos seguirem consecutivamente na linha, o operador não terá capacidade para terminar o seu trabalho antes que o produto abandone o seu raio de acção (estação respectiva) provocando uma das seguintes consequências (Boysen, Fliedner & Scholl, 2009):

- Paragem da totalidade da linha ou, caso existam *buffers* intermédios, paragem da zona da linha em que se situa a estação sobrecarregada, até que o operador consiga finalizar o seu trabalho.
- Necessidade da presença de operadores chave ou do chefe de equipa que auxilie o operador para que finalize o seu trabalho dentro da sua estação.
- Necessidade de efectuar a tarefa atrasada na última estação. Sendo esta situação viável, o produto continua a sua marcha sendo esta tarefa concluída após saída do produto da linha.
- Necessidade de retirar o produto da linha para executar as alterações. O produto é depois reinserido em linha alterando a sequência definida.

O problema oposto também pode acontecer quando se seguem diversos modelos classificados como baixos. Trata-se de um período “morto” da linha na qual o operador tem demasiado tempo para efectuar os procedimentos a ele destinados. Para uma sequenciação eficaz nenhum dos dois casos deve acontecer, pois são sinais claros de falta de produtividade. (Boysen, Fliedner & Scholl, 2009)

Ainda segundo (Boysen, Fliedner & Scholl, 2009) existem três elementos fundamentais nesta abordagem:

- **Características de cada estação**, como sendo os limites da mesma (estação aberta ou estação fechada) e os tempos de processamentos de cada posto de trabalho presentes na estação;
- **Características gerais da linha de montagem**, tal como número de estações, *layout* da linha ou velocidade da mesma.
- **Objectivos**, que podem ser evitar sobrecargas e paragens, diminuir o tempo total de montagem, reduzir os tempos mortos ou o deslocamento dos próprios operadores.

b) Sequenciação baseada na indústria automóvel (Car sequencing)

Esta abordagem é destinada sobretudo à indústria automóvel; no entanto pode ser extrapolada para outros casos. Tal como os automóveis, diversos produtos apresentam

também uma base geral à qual são adicionados os chamados “extras” ou opcionais. A presença ou ausência de um ou mais opcionais caracterizam um determinado modelo ou variante do produto. (Solnon, Cung, Nguyen & Artigues, 2007)

Partindo dos opcionais que cada modelo possui pode-se criar uma regra limitativa para a sequenciação dos mesmos. Esta regra é normalmente exprimida num rácio.

“ O problema de sequenciação na indústria automóvel é procurar uma sequência que responda à procura de cada modelo sem violar as regras definidas” (Boysen, Flidner & Scholl, 2009)

Voltando ao rácio, este apresenta-se na forma $H_0:N_0$ e significa que nos próximos N_0 produtos da sequência somente H_0 podem apresentar um ou vários opcionais seleccionados. Caso contrário ocorrerá uma sobrecarga.

A solução será procurar a sequência que menos vezes viola estas restrições (rácios), usando um peso para cada restrição de acordo com as frequências e as consequências da sua ocorrência. (Boysen, Flidner & Scholl, 2009)

Os elementos fundamentais desta abordagem são:

- **Objectivo**, como já referido, é reduzir as violações nas restrições impostas, garantindo um melhor funcionamento da linha;
- **Características operacionais**, tais como número de opções ou número de rácios de restrição definidos.

c) Sequenciação baseada no princípio do *just in time* (*Level Scheduling*)

Enquanto as duas abordagens anteriores tinham como objectivo primordial a redução das sobrecargas, a preocupação principal desta terceira abordagem é encontrar sequências que se encaixem na filosofia JIT (*just in time*) sobretudo em termos de gestão dos stocks. Idealmente procura-se reduzir os stocks de segurança criando um rácio de consumo dos componentes que se pretende tão constante quanto possível. (Monden, 1998). A ideia é então distribuir a procura existente para um determinado período temporal para que se possam manter uma taxa de consumo dos componentes que permita reduzir os stocks a cada momento. A qualidade da abordagem é tanto melhor quanto mais próxima estiver a taxa de consumo conseguida pela simulação daquela que é considerada óptima em termos logísticos e de minimização de stocks. (Scholl, 1999)

Os elementos principais desta abordagem são então (Boysen, Flidner & Scholl, 2009):

- **Objectivos**, de entre vários ligados sempre à filosofia *just in time*, sejam eles minimizar a carga de trabalho, os stocks ou as paragens de linha.
- **Características operacionais**, tais como a procura para o período ou número de estações da linha de montagem.

2.2 Operador Chave

A designação de operador chave, que vem do inglês *utility worker*, utiliza-se para descrever um operador que desempenha um papel diferente dos seus homólogos na linha de montagem. Enquanto todos os outros estão alocados a um posto de trabalho (normalmente rotativo por questões de ergonomia ou de ganho de flexibilidade), o operador chave deve estar treinado para executar a maioria das operações na sua zona de acção. Esta zona de acção contempla um número limitado de estações (inferior a 20).

A sua responsabilidade é então servir de apoio aos operadores em linha em momentos de maior sobrecarga. Quando em condições normais de linha (velocidade, modelos comum) um operador percebe que não irá conseguir terminar os seus processos dentro do espaço físico da sua estação, as suas opções serão (Boysen, Kiel & Scholl, 2010):

- Forçar a entrada na estação seguinte perturbando o operador que o sucede. Como consequência vem o atraso por parte deste segundo operador no iniciar das suas operações criando com isto um possível efeito bola de neve;
- Solicitar a paragem de linha até que consiga finalizar os ditos processos, provocando uma quebra não só na sua estação como em todas as que estão directamente ligadas a esta (considerando que não existem buffers entre todas as estações);

A terceira opção é reclamar o auxílio do elemento chave. O elemento chave como conhecedor dos processos poderá encarregar-se de uma parte destes possibilitando supostamente duplicar a velocidade de processamento do operador de linha e com isso terminar os seus processos no tempo atribuído (tempo de *takt*). No entanto, a duplicação da velocidade poderá não ocorrer porque existem restrições que não permitem que em situação real tal aconteça (Boysen, Kiel & Scholl, 2010), ou seja:

- O componente a instalar poderá ser de dimensões reduzidas e os dois operadores (operador de linha e operador chave) não conseguem manuseá-lo em simultâneo; (Becker & Scholl, 2009)
- Os operadores podem “colidir” devido ao espaço limitado no posto de trabalho, não permitindo uma duplicação da velocidade de trabalho mas apenas um ganho mais limitado. Este ganho na velocidade é variável mediante as características quer do posto de trabalho quer do modelo em montagem;
- Na mesma linha de pensamento, o operador de linha pode solicitar ajuda apenas numa fase mais adiantada não permitindo que o operador chave o auxilie na totalidade das operações;
- Devido aos constrangimentos de uma linha real, não se pode assumir um tempo nulo para a deslocação do operador chave entre diferentes auxílios ou mesmo entre diferentes posições na linha de montagem.

3. Conceitos importantes numa linha mista de montagem

Como forma de estudo prévio na temática da sequenciação de modelos nas linhas mistas de montagem foram reunidas algumas das características mais importantes que foram tidas em conta posteriormente para a concepção do aplicativo informático (simulador).

3.1 Espaço físico

O espaço físico de uma linha de montagem pode ser muito variável. As características do produto, nomeadamente a sua volumetria, assim como o grau de complexidade do processo de montagem são factores determinantes do espaço físico requerido. Facilmente se perceberá que o espaço necessário para uma instalação que permita a montagem dos componentes num telemóvel, numa máquina de lavar ou num automóvel é completamente diferente.

A divisão máxima do espaço físico de uma linha de montagem é a estação. Cada linha de montagem pode ter também um número muito distinto de estações dependendo da velocidade com que se pretende que o produto se desloque ou mesmo com a carga de processos a realizar.

Desde o início da linha até ao final da mesma, o produto vai atravessando as estações e sendo alvo dos mais diversos processos de montagem que conduzem a obtenção de um produto final.

3.1.1 Estação

A estação surge como expoente máximo do balanceamento na tentativa de colocação dos postos de trabalho com vista a otimizar a divisão dos processos dentro de uma linha de montagem. Dentro de cada estação poderão encontrar-se vários postos de trabalhos, aos quais serão alocados os respectivos operadores responsáveis pela inserção dos diversos componentes.

A identificação das estações é baseada na ordem pela qual surgem no percurso que o produto descreve ao longo da linha. Sendo assim, a primeira estação será designada de Estação 1 e assim consecutivamente até à N-ésima (Estação N).

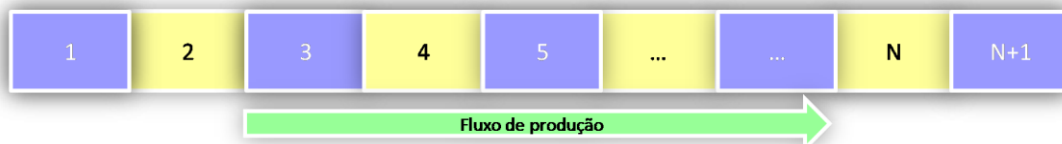


Figura 7 - Designação das estações baseada na sua posição

Dimensões da estação

As dimensões das estações dentro de uma linha são normalmente idênticas entre elas e definidas em função do tipo de produto e da velocidade de linha que se pretende implementar.

Constituem também um factor determinante na medida em que servem de base à limitação do trabalho do operador e à colocação de estruturas de apoio ou mesmo dos mecanismos destinados à montagem automática.

O comprimento de uma estação representa, em casos normais, o limite de espaço que o operador tem para completar os processos que lhe foram alocados.

A largura além de ser um factor limitador para o operador no seu espaço de acção é-o também para o posicionamento de ferramentas ou bancadas de apoio. Todos estes elementos devem estar fora dos limites impostos pela largura da linha para que não haja interferência involuntária destes com o produto. O abastecimento dos componentes é também feito através das laterais da linha sendo que os dispositivos de suporte aos stocks deverão seguir as mesmas regras.

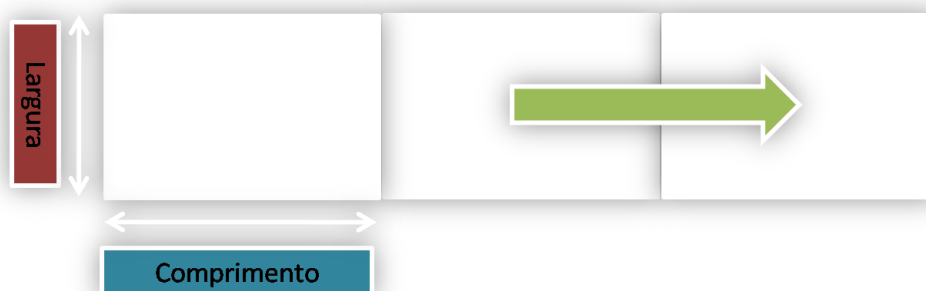


Figura 8 - Dimensões de uma estação numa linha de montagem

Zonas de trabalho dentro de estação

A área limitada pelas dimensões de uma estação deve ser dividida de forma a delimitar possíveis zonas de trabalho. As zonas de trabalho são necessárias como meio de definir o raio de acção de um operador (posto de trabalho).

Neste caso a opção foi dividir este espaço em cinco zonas distintas conforme ilustra a figura seguinte. A sua designação baseia-se na forma como se posicionam face ao produto.

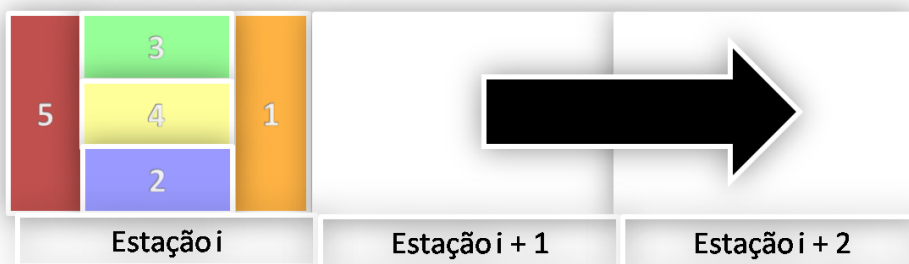


Figura 9 - Zonas de trabalho dentro da estação.

A zona 1 é denominada de zona frontal e encontra-se na frente do produto enquanto as zonas laterais direita e esquerda do produto são representadas na figura pelo número 2 e 3 respectivamente. A zona com o número 4 será uma zona central enquanto o número 5 representará a acção na zona traseira do produto.

Postos de trabalho

Um posto de trabalho corresponde normalmente a um operador para qual é definida uma sequência de tarefas, dentro do processo de montagem, que serão da sua responsabilidade.

Este operador será designado para trabalhar dentro do espaço físico de uma das estações e ocupará uma posição dentro da mesma (zonas de trabalho).

Cada operador/posto de trabalho poderá pois trabalhar em várias zonas de uma mesma estação. A designação do posto de trabalho é atribuída pelo número da estação em que este se encontra e com as zonas de trabalho pelas quais se desloca no decorrer da sua função. (F – Frente, D – Direita, E – Esquerda, C – Centro, T – Traseira).

Por exemplo, o posto de trabalho relativo ao operador que trabalha na estação 17 na frente e lateral esquerda será “17FE”. A figura seguinte apresenta mais quatro exemplos genéricos.

3.1.2 Conjuntos de estações dentro de uma linha

Tal como descrito anteriormente a linha de montagem é composta por um número limitado de estações. Em alguns casos este número poderá mesmo andar na casa das centenas havendo necessidade de recorrer a divisões da linha em parcelas aqui denominadas por secções.

Dentro das secções existem normalmente ainda subdivisões. Estas subdivisões permitem como que individualizar um número reduzido de estações facilitando a gestão das mesmas.

As secções ou subsecções podem ser divididas por buffers de forma a garantir uma maior flexibilidade face às flutuações de cargas de trabalho. Este tema será alvo de nova abordagem no ponto 1.1.3.

Secções

As secções surgem como divisões da linha de montagem e que permitem, de certa forma, individualizar partes desta com vista a facilitar a gestão e otimizar o desempenho.

A cada secção, constituída por um número definido de estações são normalmente alocadas grupos de operações semelhantes (operações eléctricas, operações com componentes de maior ou menor dimensão).

Serão representadas por letras (secção A, secção B, ...)

Subsecções

Como o próprio nome indica, são uma subdivisão das secções. Existem para permitir uma focalização superior facilitando ainda mais o controlo do processo de montagem.

São representadas pela letra da secção em que se inserem e por um número que terá em conta o número de subsecções e a ordem destas para essa secção.

Exemplo:

Uma linha de 150 estações pode estar dividida em 5 secções (A, B, C, D, E). Cada uma destas secções poderá dividir-se em 3 subsecções (A1,A2,A3;B1,B2,B3;C1, ...)

3.1.3 Buffers

Embora sejam muito comuns nas linhas de montagem, os *buffers* não foram considerados neste estudo pois funcionam como elementos que permitem uma pausa entre estações. Esta pausa garante uma margem de manobra que não iria influenciar a sequenciação. A presença de um *buffer* exigirá duas análises isoladas, uma da zona antes do buffer e outra da zona após *buffer* como se duas linhas diferentes de tratassem.

3.1.4 Restrições do espaço físico

Como anteriormente descrito, o espaço físico dentro de uma linha de montagem é bastante restrito. As pequenas dimensões que, por um lado, permitem que componentes e ferramentas estejam sempre à mão, condicionam o movimento de operadores e o posicionamento de estruturas de apoio. A presença de operadores ou elementos num determinado espaço poderá limitar o raio de acção de outros operadores.

A. Estações abertas e estações fechadas

As estações podem ser classificadas em abertas ou fechadas consoante possuam ou não postos de trabalho ou elementos nas suas adjacentes. Podem também existir situações intermédias a considerar. Assim:

- **Estações totalmente abertas**, nas quais o operador se poderá deslocar quer à estação que precede a estação à qual está afecto, quer à que a sucede a fim de recuperar um atraso ou uma falha no decorrer da execução das suas operações. Esta possibilidade advém do facto de não existirem limitações nestas estações, como elementos ou postos de trabalho. Por exemplo considera-se totalmente aberta a estação 8 (com um posto de trabalho na lateral esquerda), se e só se, quer a estação 7 quer a estação 9 não possuam qualquer tipo de elemento ou posto de trabalho na sua lateral esquerda.
- **Estações parcialmente abertas**, caso o operador possa deslocar-se a uma das estações limítrofes para concluir as suas operações. Usando o mesmo exemplo, basta que um das estações (7 ou 9) não possua restrições na sua lateral esquerda para que a estação 8 seja considerada parcialmente aberta. No caso de existir restrição na estação 7 designa-se **estação aberta a jusante**, caso contrário (restrição na estação 9) designa-se **estação aberta a montante**.
- **Estações totalmente fechadas**, caso o operador esteja fisicamente impedido de se deslocar a qualquer das estações limítrofes com vista a recuperar o atraso na execução das suas operações.

B. Elementos na estação

Em cada estação e mediante os já mencionados processos de montagem, são necessários elementos/meios auxiliares ao trabalho do operador.

Estes meios, sejam eles complexos (manipuladores de accionamento manual, robots, ...) ou mais simples (carrinhos móveis de ferramentas, bancadas de apoio, ...) representam a ocupação ou preenchimento de um espaço dentro da estação que o tornará inutilizável. Ou seja, este espaço não poderá ser usado para duplicação de mão-de-obra (novos operadores extra) ou por operadores que trabalhem nas estações adjacentes e que necessitem de prolongar o seu trabalho para além da sua estação.

3.2 Tempo definido para produção

O tempo é também um factor determinante para a sequenciação. Entende-se como o tempo definido para produção, o intervalo para o qual é possível definir uma sequência. Isto pressupõe que a procura seja conhecida para um determinado prazo de entrega.

Os tempos de produção mais comuns correspondem a:

- Procura para um turno, que deve ser satisfeita nas 8 horas de trabalho.
- Procura para um dia, que pode ser coincidente com a procura para um turno no caso de uma indústria a trabalhar apenas num turno diário, podem ser 16h se considerados dois turnos diários ou mesmo 24h se considerados três turnos.
- Procura semanal, que pode ser considerada como a junção de 5 a 7 procuras diárias dependendo mais uma vez do tipo de indústria.
- Procura mensal, quando esta é conhecida a procura para as várias semanas de um mesmo mês.

A amplitude temporal da procura está também relacionada com a flexibilidade que induz à sequenciação. Quanto maior a amplitude temporal maior será a flexibilidade da sequenciação.

3.3 Definição da procura

Dentro do período temporal considerado é importante conhecer a procura a satisfazer. Uma linha mista permite a montagem de uma enorme variedade de produtos em simultâneo, no entanto existem limites de capacidade que deverão ser tidos em conta. Cada produto, mediante as suas características próprias, exige um determinado número de processos no decorrer da sua montagem. Quer isto dizer que dentro de uma mesma linha podem coexistir produtos com diferentes tempos de processamento. É necessário pois equilibrar a sequência para que o limite de capacidade não seja ultrapassado.

Uma maior heterogeneidade da procura faculta uma maior flexibilidade de sequenciação na medida em que origina um maior número de sequências passíveis de utilização.

3.4 Velocidade da linha

Existem várias possibilidades para definição da velocidade da linha. Em algumas linhas mistas de montagem e sobretudo devido à opção por uma distribuição não uniforme dos processos pelas estações, a velocidade do transportador responsável pelo deslocamento do produto é variável. Neste estudo porém vai ser considerada uma velocidade constante do produto ao longo da linha. Esta velocidade é definida de acordo com duas variáveis:

- **Tempo do *takt***, que vem do alemão *takt time*. *Takt* significa ritmo sendo que o tempo de *takt* é definido de forma a fazer coincidir o ritmo produtivo com a procura do mercado;
- **Comprimento da estação** definido na implementação da linha.

3.4.1 Tempo de Takt

O tempo de *takt* pode ser descrito basicamente como tempo disponível para a montagem de uma unidade de produto. Calcula-se dividindo o tempo que uma empresa tem disponível pela quantidade de produtos que é pretendida pelo seu mercado.

Permite conhecer também a cadência de saída de produtos. Para uma linha contínua em cada intervalo de tempo equivalente ao *takt-time* um produto deverá estar concluído.

Exemplo:

Considerando uma procura total de 175 modelos a serem produzidos num turno produtivo (8 horas) obtêm-se:

$$\text{Tempo de Takt} = \frac{\text{Tempo de trabalho}}{\text{Procura}} = \frac{8h \times 60min}{175} \cong 2,74 \text{ min}$$

Neste turno produtivo para que a procura seja satisfeita de 2,74 em 2,74 minutos um produto deve estar finalizado, o que significa também que este é o tempo que cada produto deve levar para atravessar uma estação de comprimento constante.

Voltando à velocidade da linha, esta calcula-se então dividindo o comprimento definido para uma estação pelo tempo de takt, ou seja:

$$\text{Velocidade da linha} = \frac{\text{Comprimento da estação}}{\text{Tempo de Takt}}$$

Utilizando os valores do exemplo anterior e considerando um comprimento de linha de 5m obtêm-se:

$$\text{Velocidade da linha} = \frac{5 \text{ m}}{2,74 \text{ min}} = 1,82 \text{ m/min} = 3 \text{ cm/s}$$

3.5 Operações/Processos de montagem

As linhas de montagem, como anteriormente mencionado, são compostas por uma sequência de operações ou processos com um fim comum: a obtenção de um produto. Ao longo de toda a linha, existem inúmeras operações bastante distintas entre si. No entanto, estas operações podem ser englobadas em três grupos principais tendo em conta o grau de dependência que têm do operador. Em seguida são descritos cada um desses grupos.

3.5.1 Operações manuais

Englobam-se nas operações manuais todas aquelas que são efectuadas pelo operador com ou sem recurso a uma ferramenta passível de duplicação. São exemplos destas operações: inserções e guiamento de cablagens, posicionamentos de componentes e apertos com ferramentas não mecânicas.

3.5.2 Operações com ferramentas automáticas

São um complemento das operações manuais mas distinguem-se pelo facto das ferramentas utilizadas não serem duplicáveis. São exemplos os apertos com ferramentas eléctricas ou electrónicas

3.5.3 Operações automáticas

Consideram-se operações automáticas, todas aquelas que são efectuadas automaticamente por um mecanismo ou ferramenta ou que necessitam apenas de uma intervenção secundária por parte do operador. Neste tipo de operações, o tempo de execução depende quase exclusivamente do desempenho do mecanismo responsável. São exemplos as montagens robotizadas ou por meio de manipuladores.

Existem também outro tipo de operações que apresentam características distintas pelo que devem também ser alvo de atenção:

3.5.4 Operações de pré-montagem

As operações de pré-montagem têm a particularidade de poderem ser efectuadas independentemente do movimento natural da linha de produção e caracterizam-se, normalmente, pela junção de dois ou mais componentes. Os subprodutos resultantes das operações de pré-montagem serão depois incorporados no produto na linha de montagem. As pré-montagens, embora sejam descritas como parte integrante da responsabilidade de um posto de trabalho podem ser acumuladas pelo operador num período de maior folga.

3.5.5 Operações críticas

São designadas de operações críticas todas aquelas que têm de ser, obrigatoriamente, realizadas no posto de trabalho ao qual estão atribuídas.

Esta obrigatoriedade advém da existência de uma sequência de processos definida e que em alguns casos concretos não poderá ser alterada devido às características dos componentes e às exigências da montagem dos mesmos.

Como exemplo, pode-se considerar dois componentes a introduzir no produto base e que se posicionem um sobre o outro. Caso a inclusão do primeiro não seja feita no posto definido, a inclusão do segundo no posto seguinte estará comprometida criando-se um efeito bola de neve que pode levar a perdas de produtividade.

3.6 Cargas de Trabalho

A carga de uma estação é baseada numa percentagem, percentagem esta que resulta da comparação entre o tempo de processamento de um determinado produto num posto de trabalho e o tempo que o produto demora a atravessar a estação (*takt-time*).

$$\text{Carga total do posto de trabalho} = \frac{\text{Tempo total de processamento}}{\text{Takt - time}}$$

Durante este projecto a carga dividir-se-á em 5 intervalos que funcionarão como uma escala de cargas:

- **Cargas baixas** – entre os 0% e os 65%. Representam cargas de trabalho que, embora possam caracterizar alguns modelos/variantes de um produto, caso sejam regra na produção levarão a um baixo de nível de produtividade.
- **Cargas moderadas** – entre os 66% e os 85%. Representam cargas um pouco abaixo do ideal. No entanto poderão ser necessárias em alguns exemplos, como tarefas cujo tempo de execução dependa de factores que nem sempre poderão ser controlados.
- **Cargas ideais** – entre os 86% e os 97%. Representam cargas que garantem um bom nível de produtividade sem no entanto descurar possíveis contratempos. Garantem uma margem de manobra face ao takt-time.
- **Cargas altas** – entre os 98% e os 110%. Representam cargas que embora superem o ideal podem ser facilmente compensadas intercalando modelos com esta gama de cargas e cargas baixas e até moderadas.
- **Cargas exageradas** – A partir dos 110%. Representam cargas que embora também possam ser compensadas, tal situação torna-se mais difícil pois exigiria vários modelos com cargas bastante baixas após um modelo situado nesta gama de cargas.

Tabela 1 - Resumo dos vários níveis de cargas e cor que os representa.

Designação	Gama de cargas	Cor representativa
Cargas baixas	0 – 65%	
Cargas moderadas	66 – 85%	
Cargas ideais	86 – 97%	
Cargas altas	98% - 109%	
Cargas exageradas	a partir 110%	

3.6.1 Situações ocasionadoras de paragens

As paragens de linha são na sua maioria devidas às elevadas cargas de trabalho a que certos postos de trabalho estão sujeitos. Diferentes produtos (ou variantes /modelos do mesmo produto) apresentam diferentes cargas de trabalho que dependem das características inerentes a esses produtos.

1. **Tempo de operação das ferramentas automáticas superior que ao *takt-time*;**

Os mecanismos/ferramentas que funcionem de forma automática, sem a intervenção do operador e que requeiram um tempo específico para que sejam executadas poderá causar a paragem da linha. Isto acontece caso o tempo necessário para efectuar as mesmas operações ultrapasse o tempo de *takt* definido para a linha.

2. Carga total do posto de trabalho superior ao *takt-time* e posto de trabalho fechado a montante ou a jusante;

Sempre que a carga de trabalho ultrapassar o *takt-time* (cargas altas ou excessivas) e o operador não puder fazer a compensação deslocando-se ao espaço físico (estação) adjacente a montante e jusante na sequência, a paragem será inevitável. A restrição imposta ao operador poderá dever-se à existência de um elemento físico (máquina, superfície de apoio,...) ou de outro operador a desempenhar as suas funções nas estações limítrofes.

3. Carga total do posto superior ao *takt-time* e existência de operação crítica;

Caso exista uma operação crítica que terá obrigatoriamente de ser realizada no posto de trabalho designado e o operador por motivos de excesso de trabalho não a consiga realizar, a paragem da linha ocorrerá necessariamente.

4. Carga média de trabalho superior a 97% em 3 produtos consecutivos.

Mesmo não existindo constrangimento de outra natureza como nos pontos anteriores, no caso de 3 produtos consecutivos apresentarem uma carga média superior aos 97%, esta sequência causará muito provavelmente uma difícil recuperação por parte do operador. Mesmo que o operador consiga efectuar os 3 modelos dificilmente conseguirá recuperar de forma a garantir a montagem do produto seguinte originando uma paragem.

4. Caracterização do problema

4.1 Introdução

Este estudo visa contribuir para uma melhoria na produtividade das linhas de montagem, mais concretamente responder a uma das problemáticas mais correntes nas linhas mistas. A simultaneidade com que produtos variados se deslocam ao longo deste tipo de linhas incute uma maior complexidade quando comparada com as linhas dedicadas, quer sejam simples ou múltiplas.

De entre as problemáticas mais usuais das linhas mistas de montagens encontram-se:

1. A implementação de um correcto **balanceamento**;
2. A escolha da sequência mais adequada para lançamento dos diferentes produtos na linha (**sequenciação**).

Conforme apresentado no capítulo anterior, o balanceamento é um procedimento que deve ser considerado no estágio de concepção/definição do processo produtivo e ter um alcance de longo prazo. Uma correcta definição de características básicas como: a identificação do número de estações, o posicionamento dos operadores ao longo da linha (criação dos postos de trabalho) ou a distribuição de tarefas/procedimentos pelos diferentes postos de trabalho é decisiva para garantir a optimização dos recursos, condição essencial no ambiente competitivo actual. No entanto, este procedimento implica alterações de fundo na linha de montagem, que conduzem a custos elevados de implementação. A sua aplicação deve ser pensada e definida para um período tão longo quanto possível.

No que à sequenciação diz respeito, tema também alvo de caracterização no capítulo anterior, é um procedimento normalmente mais simples e com um período de aplicação muito mais limitado que o balanceamento. A ordem pela qual são lançados em linha os produtos poderá influenciar muito a produtividade obtida. É importante garantir uma uniformização da carga de trabalho do operador para evitar quer sobrecargas quer períodos “mortos” no decorrer do tempo definido para produção (turnos). Ao contrário do que acontece com o balanceamento, a sequenciação exige alterações menos profundas cuja decisão pode ser tomada em períodos curtos e com custos limitados. Envolve essencialmente a alteração na ordem do fornecimento à linha dos componentes, de forma a corresponder à sequência de produtos definida.

Em suma, pode perceber-se que o balanceamento é um procedimento complexo e com uma importância fulcral no correcto funcionamento de uma linha mista de montagem. No entanto, uma acção de melhoria baseada no balanceamento acarretará um tempo e custo de implementação elevados. Pelo contrário, uma melhoria alcançada pela optimização da sequência pode ser obtida de forma mais simples e com custos bastante inferiores.

A problemática da sequenciação vai ser o principal alvo deste estudo.

4.2 Problemática da sequenciação

A problemática da sequenciação não se resume à procura da melhor forma de ordenar a passagem dos modelos na linha de montagem. Esta ordenação deverá ter em conta: as características da linha anteriormente definidas aquando do balanceamento, os modelos ou variantes a fabricar, a procura do mercado para cada modelo e mesmo o tempo disponível para responder à procura.

Em cada estação ao longo da linha, cada modelo ou variante do produto será alvo de um conjunto de operações/processos que diferem. Esta diferença poderá ser mínima (detalhes próprios de cada variante, opcionais, ...) ou maior (diferentes dimensões, diferentes exigências tecnológicas, ...)

No caso da indústria automóvel por exemplo numa mesma linha de montagem podem coexistir modelos totalmente diferentes como “*roadsters*” (descapotáveis), carros compactos, carros familiares ou mesmo SUV (“*Sport Utility Vehicles*”). No entanto dentro destas grandes categorias podemos encontrar variações grandes como nos “*roadsters*” com capota rígida ou capota de lona ou mesmo pequenas variações como a presença de opcionais como o ar condicionado ou cor dos frisos interiores.

A procura actual do mercado e o tempo de resposta são também pontos importantes pois condicionam a flexibilidade da sequenciação.

Quanto maior a variabilidade da procura, maior também a capacidade do processo de sequenciação pois o número de sequencias possível será maior. A complexidade para encontrar a melhor solução aumentará também na mesma proporção.

Se o tempo de resposta for maior, ou seja, se o prazo de entrega for mais alargado existem mais formas de conjugar a procura de forma garantir uma melhor sequenciação.

Fazendo novamente referência ao exemplo da industria automóvel será mais fácil encontrar uma boa sequência se tivermos produtos das quatro categorias referidas. Pois se um SUV ou um carro familiar tem uma maior complexidade de processos já um carro compacto poderá contribuir para diminuir a carga de trabalho do operador num determinado momento permitindo-lhe alternar entre modelos com exigências diferentes em termos de tempo de processamento.

O horizonte temporal para o qual a procura é conhecida, auxilia também a sequenciação, ou seja quanto mais alargada for a base temporal usada na sequência melhor poderá ser esta.

5. Abordagem do problema

A forma de abordar o problema teve como principal objectivo a criação de uma ferramenta que permita analisar e, sempre que possível, proporcionar também melhorias ao processo de sequenciação de uma linha de montagem mista.

Esta ferramenta consiste num aplicativo informático criado propositadamente para o efeito com as seguintes preocupações:

- Retratar o maior número possível de variáveis, quer relacionadas com o produto quer com o processo de montagem, que possam influenciar a sequência de montagem;
- Garantir a flexibilidade da ferramenta para que possa ser utilizada em linhas com diferentes características (diferentes indústrias, por exemplo);
- Criar uma interface atraente, de fácil manuseamento e com um custo de utilização muito baixo.

Tendo como base um estudo prévio da temática das linhas mistas de montagem e a elaboração de uma lista com as características/variáveis que podem ser relevantes (capítulo 3), a metodologia seguida com vista à obtenção de uma ferramenta o mais útil possível teve a seguinte ordem de procedimentos:

1. Escolher o software de base ao aplicativo;
2. Definir a melhor forma para abordar cada um dos factores a incluir no aplicativo;
3. Criar os diferentes formulários;
4. Programar o simulador;
5. Definir e testar heurísticas de forma sequencial tendo em conta os problemas das anteriores.

5.1 Escolha do software de base do Simulador

Tendo-se decidido construir um simulador havia que definir as características do mesmo. A primeira opção foi utilizar um software que permitisse uma interface gráfica complexa (ex. Arena), na qual o utilizador pudesse ver cada momento da sequência reciado no ecrã do seu computador. No entanto este tipo de programas além de exigir um elevado esforço de programação nunca seria suficientemente flexível a ponto de ser usado para simular diferentes linhas com diferentes características. A mais-valia de uma interface gráfica 3D embora atraente não traria vantagens óbvias para o utilizador e o custo seria elevadíssimo (licenças de software).

A opção foi então usar um software muito completo e disponível na maioria dos meios empresariais, o Microsoft Excel 2007. A união entre a famosa folha de cálculo e a linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*) tornariam a ferramenta passível de uma utilização mais simples e mais flexível.

Partiu-se então para uma ferramenta com suporte visual VBA, sendo que os dados armazenados ficam disponíveis e alteráveis em simples folhas Excel.

5.2 Inserção dos factores no Simulador

Era importante garantir que todas as características de uma linha de montagem que possam influenciar o processo de sequenciação fossem facilmente alvo de alterações para que o simulador pudesse ser uma ferramenta flexível. A opção foi então criar diferentes formulários, cada um permitindo ao utilizador definir as propriedades da linha para finalmente criar a simulação.

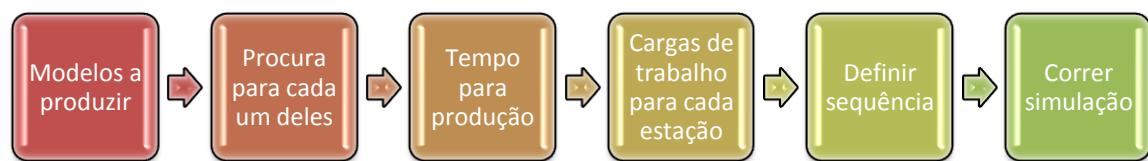


Figura 10 - Esquema resumo dos vários dados de base à simulação

5.3 Criação dos formulários

Segue-se uma pequena descrição de cada um dos formulários criados. Para cada um deles está também disponível no anexo A, uma imagem com anotações relativas aos botões (com as respectivas funções) e às informações disponibilizadas.

5.3.1 Menu principal

Tal como o próprio nome indica, é o menu base do aplicativo a partir do qual se pode aceder a todos os outros, quer para definir os dados quer para executar a simulação propriamente dita.

5.3.2 Menu modelos a produzir

Menu que permite ao utilizador criar, modificar ou eliminar modelos que serão utilizados na simulação. Permite inserir uma designação e também uma pequena descrição do modelo.

5.3.3 Menu definir procura

Neste formulário, o utilizador pode caracterizar a procura que pretende para a sua simulação inserindo numa primeira fase uma procura total e o número de modelos. Pode depois definir os modelos e a quantidade a produzir de cada um deles.

5.3.4 Menu Definir tempo de trabalho e paragens programadas

Formulário destinado à definição do tempo de trabalho para a simulação assim como o nº de paragens programadas. Para cada paragem é ainda definido a duração pretendida. Estão presentes as opções de adicionar, remover ou editar o tempo de trabalho anteriormente gravado.

5.3.5 Menu criar e definir cargas dos postos de trabalho

Trata-se do formulário mais complexo dentro do aplicativo devido ao número de dados que devem ser introduzidos. Para cada estação de trabalho devem ser criados os postos de trabalho e definidos a posição dos elementos respectivos. Para cada posto de trabalho (F) e para cada modelo (A) serão definidos: tempos de processamento (B, divisão nos três tipos de operações principais), zonas de trabalho do operador (D) e ainda a existência ou não de pré-montagens e operações críticas (C).

5.3.6 Menu definir sequências

Formulário ligado a inserção das sequências pelo utilizador. Permite adicionar novas sequências ou alterar as existentes quer através do formulário auxiliar (figura X), quer abrindo uma nova folha de cálculo para o efeito. Permite ainda remover aquelas que já não são necessárias.

5.3.7 Menu confirmar dados para a simulação

Formulário de escolha dos 3 factores anteriormente definidos: a procura, o tempo disponível/paragens e a sequência a utilizar na simulação. Permite aceder ao menu a partir do qual se corre a simulação.

5.3.8 Menu correr simulação

Formulário no qual é possível consultar todos os dados definidos para a simulação e ainda definir o horário de arranque e das paragens da linha. Possibilita também escolher a designação para a simulação. Após concluída a simulação aparecerá também um botão que permitirá criar automaticamente gráficos das cargas da estação a cada momento.

5.4 Programação do simulador

A primeira parte da programação teve como objectivo garantir que o aplicativo era capaz de guardar todas as informações inseridas pelo utilizador em folhas de cálculo permitindo um armazenamento e carregamento posterior das mesmas. Após esta primeira fase relacionada com a introdução de dados, foi programada a função principal do simulador: A análise da sequência introduzida como forma de perceber se esta permite respeitar os limites impostos como são o tempo de takt ou as características físicas da linha.

Esta análise baseia-se em três elementos fundamentais:

Elemento 1 – Tabela ilustrativa da forma com os modelos percorrem a linha passando pelas diferentes estações (postos de trabalho).

Elemento 2 – Relatório das paragens de linha

Elemento 3 – Gráficos das cargas de trabalho para cada posto de trabalho

Em seguida procede-se à descrição pormenorizada de cada elemento, apresentando um pequeno exemplo que permitirá ilustrar de forma mais clara esse mesmo elemento.

5.4.1 Elemento 1 – Tabela ilustrativa

Para cada momento da jornada de trabalho é descrito o modelo que está em cada posto de trabalho e a sua carga de trabalho. A carga média diz respeito aos 3 produtos consecutivos que passam naquela estação. A figura seguinte é uma porção exemplificativa deste elemento.

Tabela 2 - Excerto do elemento 1 de uma simulação

Hora	<u>Estação1</u>	Tempo oper.	Carga de trab.	Tempo médio 3 mod	Carga média 3 mod.		<u>Estação1</u>	Tempo oper.	Carga de trab.	Tempo médio 3 mod	Carga média 3 mod.
	1F Modelo						2DF Modelo				
7:00	Alfa	2,42	115%								
7:02	Beta	1,78	85%	2,03	97%		alfa	2,28	109%		
7:04	Delta	1,88	90%	1,85	88%		beta	2,05	98%	2,08	99%
7:07	Épsilon	1,88	90%	1,83	87%		delta	1,9	90%	1,98	94%
7:09	Fi	1,73	83%	2,11	100%		epsilon	1,98	94%	1,79	85%
7:11	Gama	2,72	129%	2,17	103%		Fi	1,48	71%	2,02	96%
7:13	Lambda	2,07	98%	2,17	103%		gama	2,6	124%	1,94	93%
7:15	Ró	1,73	83%	1,68	80%		lambda	1,75	83%	1,78	85%
7:17	Sigma	1,25	60%	1,7	81%		Ró	0,98	47%	1,41	67%
7:20	Tau	2,13	102%	1,71	81%		sigma	1,5	71%	1,6	76%
7:22	Teta	1,75	83%	2,1	100%		tau	2,32	110%	1,91	91%
7:24	Alfa	2,42	115%	1,98	94%		teta	1,92	91%	2,17	103%
7:26							alfa	2,28	109%	2,08	99%

Por exemplo, às 7:04h estará a dar entrada no posto 1F (estação 1), o modelo delta que apresenta um tempo de processamento de 1,88 minutos (corresponde a 90% do tempo de takt definido para a linha). Neste mesmo instante a carga média é de 88%, que corresponde exactamente ao cálculo da média entre as cargas da passagem do modelo anterior (7.02h - beta), do modelo actual (7.04h - delta) e do que se segue (7:07h - épsilon). As cores correspondem à escala definida para as cargas de trabalho no ponto 4.1.7 desta dissertação.

Programação

A programação deste elemento de análise é feita faseadamente. Numa primeira fase, é definido o instante temporal de acordo com a hora de início e com o tempo disponível para produção, previamente inseridos. Este intervalo é depois subdividido em intervalos mais pequenos que correspondem à divisão do tempo pelo número de produtos a montar. Obtêm-se então intervalos constantes com uma duração igual ao tempo de takt e que definem o tempo máximo que operador tem para executar as suas tarefas (carga de trabalho = 100%). A segunda fase caracteriza-se pela introdução da sequência escolhida. Como se considera que inicialmente a linha está parada, num primeiro momento apenas a primeira estação tem trabalho, num segundo momento já as duas primeiras tem trabalho e assim consecutivamente. As paragens programadas são obviamente definidas para toda a linha sendo um período com carga de trabalho igual a 0 (tempo de processamento nulo). A terceira fase é fazer a correspondência entre o posto de trabalho e o modelo, inserindo um tempo de processamento. Após esta fase, surge a divisão do tempo de processamento pelo tempo de takt definindo-se assim a carga de trabalho. A média relativa aos três produtos consecutivos é calculada como explicado anteriormente.

5.4.2 Elemento 2 – Relatório de paragens

O segundo elemento da análise da simulação é o relatório das paragens. Este relatório é composto por 3 partes: Uma descrição para cada uma das paragens como documenta a tabela imediatamente abaixo, uma tabela resumo com o número e tempo total de paragens de cada tipo (tabela 4) e ainda outra tabela que apresenta as paragens divididas por tipo e por posto de trabalho (tabela 5).

Tabela 3 - Exemplo de uma descrição de paragens.

Paragens							
Nº Paragem	Estação/Posto de trab.	Hora	Modelos	Nº Causa	T. de paragem (seg)	Carga	
1	Estação 1 PT 1F	07:06 - 07:10	epsilon fi gama	4	4	100%	
2	Estação 1 PT 1F	07:08 - 07:13	fi gama lambda	4	8	103%	
3	Estação 1 PT 1F	07:10 - 07:15	gama lambda ró	4	8	103%	
4	Estação 1 PT 1F	07:19 - 07:23	tau teta alfa	4	4	100%	
5	Estação 1 PT 1F	7:00	Alfa	2	24	115%	(A)
6	Estação 1 PT 1F	7:11	Gama	1	38	129%	
7	Estação 1 PT 1F	7:24	Alfa	2	24	115%	(A)
8	Estação 2 PT 2DF	07:02 - 07:06	alfa beta delta	4	3	99%	
9	Estação 2 PT 2DF	07:19 - 07:23	tau teta alfa	4	8	103%	
10	Estação 2 PT 2DF	07:21 - 07:25	teta alfa beta	4	3	99%	
11	Estação 2 PT 2DF	7:23	Tau	3	18	110%	

Este pequeno excerto é correspondente à mesma sequência da tabela 3 e permite demonstrar a forma como se apresentam as descrições das paragens. Para cada paragem é possível saber o posto de trabalho responsável, a hora ou intervalo em que ocorre, os modelos que estarão na(s) estação(ões) , a causa da paragem (pode ser consultada a

legenda na tabela 7), o tempo durante o qual estará a linha parada e a carga de trabalho que deu origem à paragem. A última coluna aqui simbolizada com o (A) apresenta para o caso das paragens tipo 2, a zona na qual o trabalho do operador é obstruído (legenda na tabela 7)

Tabela 4 - Exemplo de tabela resumo de paragens.

	Paragens			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Nº Paragens	1	2	1	7
Tempo Paragens (seg)	38	48	18	38

Ainda para o mesmo exemplo, acima apresenta-se o resumo da totalidade de paragens dividida por tipo de paragens (legenda na tabela 7).

Tabela 5 - Exemplo de tabela de paragens por posto de trabalho.

Posto de Trabalho	Carga Média	Nº Paragens	Tempo paragens (seg)	Tipo de Paragens							
				Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4	
<u>Estação 1</u>				Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo
1F	94%	7	110	1	38	2	48	0	0	4	24
<u>Estação 2</u>											
2DF	91%	4	32	0	0	0	0	1	18	3	14

A terceira fase do relatório de paragens consiste numa tabela que apresenta para cada posto de trabalho: a carga média de trabalho, o número e tempo total de paragens e sua divisão várias tipos de paragem.

Tabela 6 - Legenda relativa aos tipos de paragem.

Legenda das causas de paragem	
Tipo	Explicação
1	Tempo automático superior ao takt
2	Tempo maior que o takt e estações limítrofes fechadas
3	Tempo maior que o takt e operação crítica
4	Carga média 3 produtos maior de 97% do takt
(A)	Elementos na estação seguinte - Elementos na estação anterior

Programação

A programação com vista a elaboração do relatório tem como base o elemento 1 (tabela 3). As paragens do tipo 1 são obtidas comparando o tempo automático de cada modelo em cada posto de trabalho com o tempo de takt.

As paragens do tipo 2 exigem comparar a carga total de trabalho para cada modelo com o tempo de takt. No caso de a carga ser maior que o limite de 97% do takt, comparam-se os

postos de trabalho e os elementos presentes nas estações. Caso sejam em zonas coincidentes ocasionam a paragem.

As paragens do tipo 3 são obtidas por comparação da carga total com o tempo de takt. Caso seja superior verifica-se se o modelo correspondente tem operações críticas definidas para o posto de trabalho. Caso existam a paragem é relatada.

As paragens do tipo 4 são obtidas quando a carga média dos 3 produtos consecutivos ultrapassa os 97%.

5.4.3 Elemento 3 – Gráficos das cargas para cada posto de trabalho

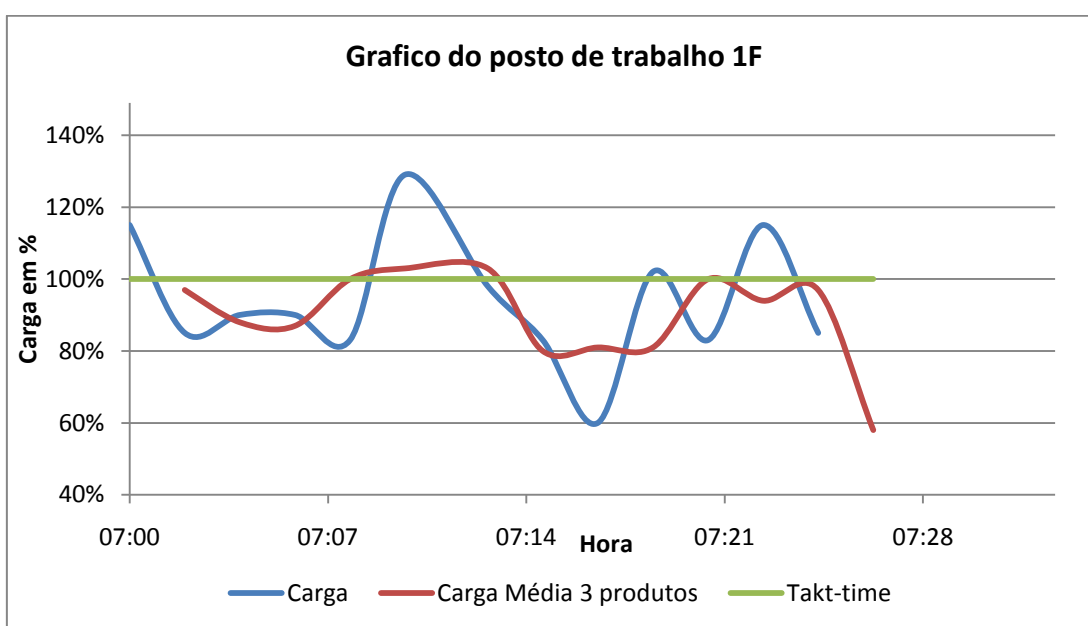


Figura 11 - Exemplo de um gráfico de cargas.

O terceiro elemento de análise, são os gráficos da carga em cada posto de trabalho. A forma como quer a carga de trabalho, quer a carga média de 3 produtos consecutivos varia permite aferir sobre a forma como a sequência é ou não capaz de homogeneizar o tempo de trabalho do operador durante a jornada. Usando este exemplo (em que embora não esteja a ser utilizada nenhuma das heurísticas que serão mais tarde apresentadas) nota-se uma flutuação entre cargas mais altas e mais baixas pela ondulação na linha azul. Isto garante que a linha vermelha representante da carga média dos 3 produtos se apresente geralmente abaixo da linha do tempo de takt (verde). No entanto poderão ser implementadas melhorias.

Programação

Os gráficos são criados de forma análoga ao processo manual. Para cada posto de trabalho são recolhidos automaticamente os dados relativos às cargas e cargas médias para cada intervalo definido.

5.5 Criação e teste de heurísticas de melhoria

Com vista a obter uma sequência que permita reduzir, dentro do possível, as paragens de linha não programadas foram desenvolvidos e testados vários procedimentos. Começando por uma sequência de base obtida com um critério aleatório que em nada se relaciona com as características inerentes quer a modelos quer a postos de trabalho, partiu-se para várias outras procurando com cada novo procedimento (heurística) responder aos problemas encontrados no anterior.

Criaram-se então dois testes. O primeiro de menor dimensão no qual se testaram consecutivamente diversas heurísticas e o segundo já bastante mais elaborado e próximo de uma situação real que serviu apenas para confirmar a aplicabilidade da melhor heurística.

As heurísticas tiveram como objectivo reduzir as paragens do tipo 4 que se relacionam com a carga média de três modelos consecutivos em linha.

As restantes paragens não poderão ser resolvidas apenas alterando a sequência visto que as paragens do tipo 1 são relacionadas com os tempos de ferramentas automáticas sendo por isso fixas e não alteráveis; as paragens do tipo 2 e 3 acontecem quando um dos modelos tem um tempo de processamento elevado e existem restrições definidas que não permitem ao operador recuperar (operações críticas e estações adjacentes fechadas).

5.5.1 Teste 1 – Mini linha com produtos muito diferentes entre si

Definiu-se então, uma mini linha de montagem com modelos em geral bastante diferentes entre si, um tempo de trabalho e uma procura de mercado tentando de uma forma aproximada recriar uma situação real que possa servir de teste para os vários métodos a aplicar. As características escolhidas foram as seguintes:

- 11 modelos distintos
- 7 postos de trabalho divididos por 5 estações
- 420 minutos de tempo útil para produção
- Procura total de 200 produtos
- *Takt-time* aproximado de 126 segundos

Modelos a produzir

Foram criados para efeitos da reprodução da mini linha de montagem onze modelos distintos, todos eles com diferentes características mas que se podem incluir em três tipos principais:

- Modelos pesados, apresenta uma carga média de trabalho superior a 90%;
- Modelos médios, apresenta uma carga média de trabalho que se situa entre os 75% e 90%;
- Modelos baixos, apresenta uma carga média de trabalho inferior a 75%

A carga média surge somente como um indicador geral da complexidade do modelo, calculado através de um tempo de processamento médio dividido pelo *takt-time* definido para a linha. No entanto, estas cargas são variáveis de posto para posto de trabalho e apresentam-se na tabela seguinte:

Tabela 7 - Modelos e respectivas cargas médias de trabalho para o teste.

Modelo	Caracterização	Tempo médio de processamento (seg.)	Carga média de trabalho
<u>Alfa</u>	modelo pesado	149	118%
<u>Beta</u>	modelo médio	117	93%
<u>Delta</u>	modelo médio	116	92%
<u>Fi</u>	modelo baixo	90	71%
<u>Teta</u>	modelo médio	115	91%
<u>Gama</u>	modelo pesado	144	114%
<u>Sigma</u>	modelo baixo	94	74%
<u>Épsilon</u>	modelo médio	115	91%
<u>Ró</u>	modelo baixo	82	65%
<u>Lambda</u>	modelo médio	115	91%
<u>Tau</u>	modelo pesado	147	117%

Postos de trabalho

Mais uma vez na tentativa de aproximar o teste à realidade, para cada um dos postos foram definidas operações/processos distintas entre si. O posicionamento dos postos pode ser consultado na tabela seguinte.

Tabela 8 - Estações e postos de trabalhos para o teste.

<u>Estação 1</u> 2 postos de trabalhos	<u>Estação 2</u> 1 posto de trabalho	<u>Estação 3</u> 2 postos de trabalhos	<u>Estação 4</u> 1 posto de trabalho	<u>Estação 5</u> 1 posto de trabalho
---	---	---	---	---

Posto de trabalho 1F – Predominância de operações como guiamentos de cablagem ou encaixes manuais. Presença também de operações com ferramenta automáticas em pequeno número como apontar de parafusos.

Posto de trabalho 1E – Posto relativamente semelhante ao 1F apenas com mais carga manual e menor utilização de ferramentas automáticas.

Posto de trabalho 2C – Operações manuais como colocação e posicionamento de componentes variados. Presença de alguns apertos.

Posto de trabalho 3T – Operações conduzidas automaticamente com acção mínima do operador. Por exemplo colocação de um componente de grandes dimensões ou que exige um manuseamento delicado.

Posto de trabalho 3D – Operações manuais de apoio ao automatismo do posto 3T, por exemplo, ajuste e colocação de parafusos para aperto do componente.

Posto de trabalho 4F – Últimas verificações manuais dos componentes inseridos e apontar com ferramenta automática de alguns parafusos.

Posto de trabalho 5E – Predominância de operações com ferramentas automáticas. Representa o aperto de todos os parafusos anteriormente apontados.

Como sumário, a tabela seguinte mostra o peso que cada tipo de operações representa no total do tempo disponível para cada posto de trabalho.

Tabela 9 - Peso de cada tipo de operações na carga de trabalho do posto.

Tipo de Operações / Posto de Trabalho	1F	1E	2C	3T	3D	4F	5E
<u>Operações manuais</u>	55%	67%	78%	5%	63%	50%	12%
<u>Operações c/ ferramentas automáticas</u>	12%	4%	3%	-	7%	23%	71%
<u>Operações automáticas</u>	-	-	-	79%	-	-	-
<u>Outras operações, deslocamentos, etc.</u>	33%	29%	19%	16%	30%	17%	18%

Cargas de trabalho

Os tempos de processamento para cada modelo em cada posto de trabalho podem ser encontrados na tabela 57 do anexo B. Nesta tabela estão também calculadas as cargas de trabalho tendo em conta o tempo de *takt* definido para esta simulação.

Tempo para produção e procura

Definiu-se como instante temporal, para testar as diferentes sequências, o correspondente a um turno de trabalho, ou seja, 8 horas. Definiram também três paragens num total de 60 minutos obtendo-se um tempo útil de produção de 7 horas ou 420 minutos como ilustra a seguinte tabela (tabela 10). Definiu-se uma procura passível de ser efectuada num turno produtivo. Considerou-se uma procura total de 200 unidades divididas entre os diferentes modelos conforme mostra a tabela 11.

Tabela 10 - Número e tempos de paragens programadas

Tempo total		8h × 60 min	480 min
Nº paragens			3
Tempo paragem	Paragem 1	Paragem 2	Paragem 3
	15 min	30 min	15 min
Tempo total paragem		15 + 30 + 15 min	60 min
Tempo útil produção		480 - 60 min	420 min

Tabela 11 - Procura para cada um dos modelos

Modelo	Procura	Peso na proc. total
<u>Alfa</u>	20	10%
<u>Beta</u>	25	13%
<u>Delta</u>	10	5%
<u>Fi</u>	35	18%
<u>Teta</u>	25	13%
<u>Gama</u>	5	3%
<u>Sigma</u>	15	8%
<u>Épsilon</u>	20	10%
<u>Ró</u>	15	8%
<u>Lambda</u>	25	13%
<u>Tau</u>	5	3%
Total	200	100%

Takt-time

Definidas a procura e o tempo útil para produção, o *takt-time* para a simulação foi calculado da seguinte forma:

$$Takt - time = \frac{Procura\ total}{Tempo\ útil} = \frac{200\ unid.}{420\ min \times 60} \approx 126\ s.$$

Heurísticas

1ª Sequência – Ordem Alfabética

A sequência utilizada como base para o teste teve como critério a ordem alfabética das designações dos modelos. Não foram, por isso, tidas em conta, quer carga de trabalho quer a procura de cada modelo.

A sequência foi então obtida ordenando alfabeticamente os modelos permitindo obter assim várias mini sequências. A primeira mini sequência apresenta todos os modelos e repete-se 5 vezes (correspondente à menor procura de entre os modelos). A segunda mini sequência obtém-se a partir da primeira, retirando apenas os elementos que se esgotaram na primeira. As seguintes mini sequências obtém-se pelo mesmo processo. A tabela seguinte mostra as várias mini simulações, o número de repetições e as posições que ocupam na sequência de 200 unidades.

Tabela 12 - Método para obtenção da sequência por ordem alfabética

<u>Posições na sequência</u>	1 – 55	56 – 100	101 – 140	141 – 170	171 – 190	191 – 200
<u>Repetições</u>	5	5	5	5	5	10
<u>Modelos</u>	Alfa	Alfa	Alfa	Alfa	Beta	Fi
	Beta	Beta	Beta	Beta	Fi	
	Delta	Delta	Épsilon	Épsilon	Lambda	
	Épsilon	Épsilon	Fi	Fi	Teta	
	Fi	Fi	Lambda	Lambda		
	Gama	Lambda	Ró	Teta		
	Lambda	Ró	Sigma			
	Ró	Sigma	Teta			
	Sigma	Teta				
	Tau					
	Teta					

Resultados

Obteve-se um total de 359 paragens a que correspondem 3301 segundos. Destes, 2541 segundos (339 paragens) referem-se a paragens do tipo 4 que serão alvo de melhoria ao longo deste capítulo. Este valor era contudo esperado nesta primeira fase pois ainda não foi posto a prova nenhum critério determinante para a sequenciação. Os resultados apresentam-se de forma detalhada na tabela seguinte.

Tabela 13 - Detalhes sobre as paragens divididos por postos de trabalho (1ª simulação)

	Carga Média	Nº Paragens	Tempo paragens (seg)	Tipo de Paragens							
				Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4	
<u>Estação 1</u>				Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo
1F	90%	23	129	0	0	0	0	0	0	23	129
1E	86%	43	164	0	0	0	0	0	0	43	164
<u>Estação 2</u>											
2C	92%	76	1310	0	0	20	760	0	0	56	550
<u>Estação 3</u>											
3T	98%	96	568	0	0	0	0	0	0	96	568
3D	84%	14	62	0	0	0	0	0	0	14	62
<u>Estação 4</u>											
4F	88%	47	403	0	0	0	0	0	0	47	403
<u>Estação 5</u>											
5E	87%	60	665	0	0	0	0	0	0	60	665
<u>Total</u>		<u>359</u>	<u>3301</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>760</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>339</u>	<u>2541</u>

Os 2541 segundos de tempo de paragem (tipo 4) significam 10% do total de tempo produtivo e correspondem a perdas na montagem de um total de 20 unidades de produto.

$$\frac{\text{Tempo paragens}}{\text{Tempo útil produção}} = \frac{2541}{420 \times 60} \cong 10\%$$

$$\text{Procura não satisfeita} = \frac{\text{Tempo paragens}}{\text{Tempo de takt}} = \frac{2541}{126} = 20 \text{ unidades}$$

Analisando os resultados posto a posto de trabalho:

- Ocorrem paragens do tipo 4 em todos os postos de trabalho, com predominância para os 2C, 3T, 4F e 5E. Vamos de seguida ordena-los de acordo com o tempo de paragem de linha que provocam. Vêm então:

Tabela 14 - Peso de cada posto de trabalho no total de paragens.

Posto de Trabalho	Nº de paragens	Tempo paragem (seg.)	Tempo paragem / Tempo total paragens	Tempo paragem / tempo útil produção
5E	60	665	26%	2,64%
3T	96	568	22%	2,25%
2C	56	550	22%	2,18%
4F	47	403	16%	1,60%
1E	43	164	6%	0,65%
1F	23	129	5%	0,51%
3D	14	62	2%	0,25%

Conclui-se pois, que o posto de trabalho mais crítico em termos de paragens neste momento é o 5E. Seguir-se-á uma análise deste posto e da carga para cada modelo, no mesmo. A próxima heurística terá com base as cargas deste posto que se apresentam na tabela seguinte, procurando jogar com variação entre as cargas dos diferentes modelos para evitar paragens.

Tabela 15 - Cargas de trabalho relativas ao posto 5E.

Modelo	1.Tempo de Operações (seg.)	2. Carga de trabalho = 1 / Takt-time	Ordem de Carga	Procura
Alfa	158	125%	2	20
Beta	125	99%	4	25
Delta	113	90%	8	10
Fi	64	51%	10	35
Teta	124	98%	5	25
Gama	127	101%	3	5
Sigma	93	74%	9	15
epsilon	119	94%	6	20
Ró	61	48%	11	15
lambda	115	91%	7	25
Tau	159	126%	1	5

A ordem de carga permite categorizar os elementos de maior carga de trabalho (1) até ao menor (neste caso 11).

2ª Sequência – Procedimento 1

Este primeiro procedimento consiste muito simplesmente em juntar o modelo com maior carga de trabalho com o de menor carga de trabalho criando conjuntos de 2 modelos que serão sequenciais na linha de montagem. No entanto, como a procura de cada modelo é limitada, vão sendo introduzidos os modelos seguintes de acordo com a ordem de carga. A tabela seguinte ilustra a forma como foi conseguida a sequência segundo este procedimento.

Tabela 16 - Obtenção da 2ª sequência pelo procedimento 1

Ordens de carga		Modelo		Procura não satisfeita		Repetição possível
1	11	Tau	Ró	5	15	5
2	11	Alfa	Ró	20	10	10
2	10	Alfa	Fi	10	35	10
3	10	Gama	Fi	5	25	5
4	10	Beta	Fi	25	20	20
4	9	Beta	Sigma	5	15	5
5	9	Teta	Sigma	25	10	10
5	8	Teta	Delta	15	10	10
5	7	Teta	Lambda	5	25	5
6	7	Épsilon	Lambda	20	20	20

Resultados

Nesta segunda sequência obteve-se um total de 246 paragens do tipo 4 num total de 1628 segundos. Os resultados para os restantes tipos de paragem mantiveram-se inalterados como seria de esperar. Os dados mais detalhados estão apresentados na tabela seguinte.

Tabela 17 - Detalhes sobre as paragens divididos por postos de trabalho (2ª simulação)

	Carga Média	Nº Paragens	Tempo paragens (seg)	Tipo de Paragens							
				Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4	
<u>Estação 1</u>				Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo
1F	90%	29	260	0	0	0	0	0	0	29	260
1E	86%	4	38	0	0	0	0	0	0	4	38
<u>Estação 2</u>											
2C	92%	82	1233	0	0	20	760	0	0	62	473
<u>Estação 3</u>											
3T	98%	86	514	0	0	0	0	0	0	86	514
3D	84%	13	25	0	0	0	0	0	0	13	25
<u>Estação 4</u>											
4F	88%	28	222	0	0	0	0	0	0	28	222
<u>Estação 5</u>											
5E	87%	24	96	0	0	0	0	0	0	24	96
<u>Total</u>		<u>266</u>	<u>2388</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>760</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>246</u>	<u>1628</u>

A redução do tempo de paragens pode ser considerada positiva. Passou-se dos 10% do tempo total de produção para “apenas” 6% e de 20 unidades para 13 de procura não satisfeita. Obteve-se pois uma redução de 36% conforme demonstra a tabela seguinte:

Tabela 18 - Comparação entre 1ª e 2ª sequência em termos de paragens

	1ª Sequência	2ª Sequência	Comparação
	Tipo 4		
Nº Paragens	339	246	-93
Tempo Paragens (seg)	2541	1628	-36%
% do tempo total	10%	6%	
Procura ã satisfeita	20	13	

Analisando os resultados posto a posto de trabalho:

No global das estações o número total de paragens do tipo 4 reduz-se significativamente. Tal seria de esperar pois, tal como descrito anteriormente, a sequência inicial não apresenta qualquer esforço para intercalar modelos com diferentes cargas ou procuras.

Analisando detalhadamente as pausas do tipo 4, percebe-se que o posto de trabalho que foi o alvo para sequenciação conseguiu uma grande redução no tempo de paragens. No entanto, essa melhoria não se observou quer no posto 1F, cujos tempos paragens quase duplicaram, quer nos postos 3T ou 2C cuja melhoria se mostrou pouco significativa. A tabela seguinte apresenta todos estes valores:

Tabela 19 - Comparação entre a 1ª e 2ª sequência para cada posto de trabalho.

Tabela 15 - Comparação entre 1ª e 2ª sequência para cada posto de trabalho					
	1ª Sequência		2ª Sequência		Comparação
	Tipo 4				
	Nº	Tempo	Nº	Tempo	
<u>Estação 1</u>					
1F	23	129	29	260	+102%
1E	43	164	4	38	-77%
<u>Estação 2</u>					
2C	56	550	62	473	-14%
<u>Estação 3</u>					
3T	96	568	86	514	-10%
3D	14	62	13	25	-60%
<u>Estação 4</u>					
4F	47	403	28	222	-45%
<u>Estação 5</u>					
5E	60	665	24	96	-86%

Concluindo, ao juntar os produtos com maior e menor carga, dois a dois, embora se tenha obtido uma melhoria relativa face a sequência inicial, esta poderá vir a ser mais significativa usando outro procedimento. A menor capacidade deste procedimento pode estar relacionada com a opção por definir pares, visto que a análise é feita a cada três modelos e nesses três estão normalmente dois modelos com cargas elevadas. Por exemplo:

O modelo alfa é um modelo de carga elevada e mesmo sendo Ró um modelo de carga baixa, uma sequência definida Alfa-Ró ocasionará diversas paragens como a seguinte

Tabela 20 - Explicação da ineficácia da junção de modelos dois a dois.

Posto de Trabalho	Hora	Sequência	Carga	Carga média
1F	7:23 – 7:27	Alfa	115%	104%
		Ró	83%	
		Alfa	115%	

Partiu-se então para um procedimento que considere mini sequências de três modelos.

3ª Sequência – Procedimento 2

O segundo procedimento surge como tentativa de solucionar o problema atrás encontrado e consiste em fazer pequenos conjuntos de três modelos que permitirá intercalar modelos com cargas altas, cargas médias e cargas baixas para que estas não ultrapassem o limite definido de 97% do tempo de *takt*. A ideia será juntar o modelo de carga mais alta (1), o de carga mais baixa (11) e um terceiro modelo de carga média (correspondente à mediana entre as ordens de carga dos produtos ainda não inseridos, neste caso o 6)

Tabela 21 - Ordens de carga do posto de trabalho 5E.

Tau	Alfa	Gama	Beta	Teta	Épsilon	Lambda	Delta	Sigma	Fi	Ró
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabela 22 - Obtenção da 3ª sequência pelo procedimento 2.

Ordens de carga			Modelo			Procura não satisfeita			Repetição possível
1	6	11	Tau	Épsilon	Ró	5	20	15	5
2	7	11	Alfa	Lambda	Ró	20	25	10	10
2	6	10	Alfa	Épsilon	Fi	10	15	35	10
3	7	10	Gama	Lambda	Fi	5	15	25	5
4	7	10	Beta	Lambda	Fi	25	10	20	10
4	8	10	Beta	Delta	Fi	15	10	10	10
4	6	9	Beta	Épsilon	Sigma	5	5	15	5
5	9		Teta	Sigma		25	10		10
5			Teta			15			15

Resultados

Os resultados desta terceira sequência foram: 218 paragens do tipo 4 num total de 967 segundos. Todos os detalhes estão apresentados na tabela seguinte, os dados referentes às paragens tipo 1, 2 e 3 deixaram de estar presentes pois são comuns a todas as simulações.

Tabela 23 - Detalhes sobre as paragens do tipo 4 para cada posto de trabalho (3ª simulação)

	Carga Média	Paragens	
		Tipo 4	
<u>Estação 1</u>		Nº	Tempo
1F	90%	45	206
1E	86%	0	0
<u>Estação 2</u>			
2C	92%	45	315
<u>Estação 3</u>			
3T	98%	115	407
3D	84%	0	0
<u>Estação 4</u>			
4F	88%	0	0
<u>Estação 5</u>			
5E	87%	13	39
Total		218	967

A redução do tempo de paragens conseguida superou bastante a do procedimento anterior. Obteve-se um ganho de 62% no tempo total de paragens e uma redução de 121 paragens face à simulação inicial (nº1). Esta redução permitiu passar dos 10% do tempo total de produção para 4% e de 20 unidades para 8 de procura não satisfeita. A tabela seguinte ilustra as diferenças entre as três sequências testadas até ao momento. Esta situação garante à partida que a opção por agrupar os modelos três a três trará melhores resultados no que diz respeito à minimização das paragens de linha.

Tabela 24 - Comparação entre as 3 sequências em termos de paragens

	1ª Sequência	2ª Sequência	Comparação	3ª Sequência	Comparação
Tipo 4					
Nº Paragens	339	246	-93	218	-121
Tempo Paragens (seg)	2541	1628	-36%	967	-62%
% do tempo total	10%	6%		4%	
Procura ã satisfeita	20	13		8	

Analisando os postos de trabalho individualmente:

Chama a atenção o facto de três dos sete postos de trabalho verem as suas paragens reduzidas a zero (comparação = -100%) enquanto o posto focado reduz em 94% as suas paragens face ao inicialmente proposto. No entanto, se o problema para estas quatro estações está solucionado, tanto a estação 1F que mantém um aumento de paragens face à sequência original como as restantes duas (2C e 3T) que embora tenham reduzido os tempos de paragem, necessitam ainda de uma melhoria significativa.

Tabela 25 - Comparação entre as 3 sequências para cada posto de trabalho.

	1ª Sequência		2ª Sequência		Comparação	3ª Sequência		Comparação
	Tipo 4					Tipo 4		
	Nº	Tempo	Nº	Tempo		Nº	Tempo	
<u>Estação 1</u>								
1F	23	129	29	260	102%	45	206	+60%
1E	43	164	4	38	-77%	0	0	-100%
<u>Estação 2</u>								
2C	56	550	62	473	-14%	45	315	-43%
<u>Estação 3</u>								
3T	96	568	86	514	-10%	115	407	-28%
3D	14	62	13	25	-60%	0	0	-100%
<u>Estação 4</u>								
4F	47	403	28	222	-45%	0	0	-100%
<u>Estação 5</u>								
5E	60	665	24	96	-86%	13	39	-94%

Avaliando as situações de paragem e as causas que as originam encontraram-se três factores que podem ser decisivos:

- As relações entre as mini sequências definidas, ou seja, na passagem entre mini sequências encontram-se por vezes mais de um modelo pesado, ou um pesado e dois médios que provocam a paragem.
- A discrepância de cargas de um modelo, visto que um modelo é normalmente caracterizado de acordo com a sua complexidade (pesado, médio, baixo), no entanto existe uma variabilidade da sua carga de trabalho ao longo das estações. O facto de a sequenciação estar a ser feita tendo como base apenas uma estação condiciona essa análise.
- As mini sequências compostas por apenas um modelo, que podem acontecer caso exista um ou mais modelos com procuras elevadas e que segundo a ordem de carga de trabalho sejam apenas alocados em último lugar.

Partiu-se então por dois caminhos distintos. Primeiro testar a influência das relações entre as mini sequências, depois perceber qual o melhor posto de trabalho a ter como base e por último tentar sempre que possível obter mini sequências de três modelos.

4ª Sequência – Procedimento 2.1

Partindo da sequência definida no procedimento 2 e procurando trabalhar sobre uma das questões levantadas anteriormente, este novo procedimento consiste em trabalhar a relação

entre os conjuntos de três modelos formados. Ou seja, obtêm-se as ordens de carga neste caso para cada conjunto (tabela 26) intercalando-se os conjuntos com maior, menor e média ordem de carga como apresentado em seguida (tabela 27).

Tabela 26 – Ordens de cargas para os conjuntos definidos no procedimento 2.

Ordens de carga			Modelo			Procura não satisfeita			Repetição possível	Carga média (3 mod.)	Ordem carga média
1	6	11	Tau	Épsilon	Ró	5	20	15	5	89%	3
2	7	11	Alfa	Lambda	Ró	20	25	10	10	88%	5
2	6	10	Alfa	Épsilon	Fi	10	15	35	10	90%	2
3	7	10	Gama	Lambda	Fi	5	15	25	5	81%	7
4	7	10	Beta	Lambda	Fi	25	10	20	10	80%	8
4	8	10	Beta	Delta	Fi	15	10	10	10	80%	9
4	6	9	Beta	Épsilon	Sigma	5	5	15	5	89%	4
5	9	-	Teta	Sigma	---	25	10	-	10	86%	6
5	-	-	Teta	---	---	15	-	-	15	98%	1

Tabela 27 - Obtenção da 4ª sequência pelo procedimento 2.1.

Ordens de carga			Procura não satisfeita			Repetição possível
1	5	9	15	10	10	10
1	4	8	5	5	10	5
2	6	8	10	10	5	5
2	6	7	5	5	5	5
3			5			5

Resultados

Os resultados apontaram 188 paragens do tipo 4 num total de 1004 segundos.

A redução obtida foi muito próxima da do procedimento anterior, de notar apenas um menor número de paragens (-30) mas com um maior tempo na sua totalidade (+37 segundos). Face a esta pequena diferença manteve-se a procura não satisfeita. A tabela seguinte mostra a comparação.

Tabela 28 - Comparação entre as 4 sequências em termos de paragens do tipo 4.

	1ª Sequência	2ª Sequência	Comparação	3ª Sequência	Comparação	4ª Sequência	Comparação
Tipo 4							
Nº Paragens	339	246	-93	218	-121	188	-151
Tempo parag.(seg)	2541	1628	-36%	967	-62%	1004	-60%
% tempo total	10%	6%		4%		4%	
Procura ã satisfeita	20	13		8		8	

Analisando posto a posto de trabalho:

Mais uma vez se vê a proximidade entre o procedimento 2 e este actual (procedimento 2.1). Efectivamente ocorrem melhorias no posto 1F (primeiro procedimento que reduz paragens face ao original) e 2C (pequena melhoria) que no entanto não se verificam nos postos 3T e 5E. A tabela seguinte mostra em detalhe todos estes valores.

Tabela 29 - Comparação entre as 4 sequências para cada posto de trabalho.

	1ª Sequência		2ª Sequência		Comparação	3ª Sequência		Comparação	4ª Sequência		Comparação
	Tipo 4					Tipo 4			Tipo 4		
	Nº	Tempo	Nº	Tempo		Nº	Tempo		Nº	Tempo	
Estação 1											
1F	23	129	29	260	102%	45	206	60%	34	127	-2%
1E	43	164	4	38	-77%	0	0	-100%	0	0	-100%
Estação 2											
2C	56	550	62	473	-14%	45	315	-43%	37	291	-47%
Estação 3											
3T	96	568	86	514	-10%	115	407	-28%	97	456	-20%
3D	14	62	13	25	-60%	0	0	-100%	0	0	-100%
Estação 4											
4F	47	403	28	222	-45%	0	0	-100%	10	30	-93%
Estação 5											
5E	60	665	24	96	-86%	13	39	-94%	10	100	-85%

Concluiu-se pois que a questão da ligação entre os conjuntos formados de 3 modelos não é um problema maior. Comparando os valores do tempo de paragem optou-se por continuar a considerar o procedimento 2 como o melhor até ao momento. Partiu-se então para um procedimento que responda às restantes duas questões levantadas anteriormente, a estação de base para a sequenciação e evitar os conjuntos de apenas um elemento.

5ª Sequência – Procedimento 3

Olhando novamente para a tabela inicial de cargas e paragens para os postos de trabalho (resultante da simulação 1) encontra-se uma discrepância visível entre o tempo de paragem e as cargas. O posto de trabalho mais problemático deveria ser o 3T pois além de apresentar a carga mais alta (até supera os 97%, valor que se considerou ser o patamar superior das cargas ideais), é o ocasionador da maioria das paragens (96 paragens). Os dados correspondentes apresentam-se na tabela seguinte:

Tabela 30 - Cargas médias e paragens do tipo 4 referentes à 1ª simulação.

Posto de Trabalho	Carga Média	Paragens	
		Tipo 4	
		Nº	Tempo
<u>1F</u>	90%	23	129
<u>1E</u>	86%	43	164
<u>2C</u>	92%	56	550
<u>3T</u>	98%	96	568
<u>3D</u>	84%	14	62
<u>4F</u>	88%	47	403
<u>5E</u>	87%	60	665

Este procedimento irá ter então como base o posto de trabalho 3T que é o *bottleneck* desta linha fictícia de montagem. Serão alvo de análise os dados deste posto para estabelecer uma nova ordem de carga. Este dados estão disponíveis no anexo B (tabela 58). A ordem de carga dos modelos é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 31 - Ordem de cargas para os modelos no posto de trabalho 3T

Gama	Tau	Alfa	Beta	Lambda	Delta	Épsilon	Fi	Teta	Sigma	Ró
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabela 32 - Obtenção da 5ª sequência pelo procedimento 3

Ordens de carga			Modelo			Procura não satisfeita			Repetição possível
1	6	11	Gama	Delta	Ró	5	10	15	5
2	7	11	Tau	Épsilon	Ró	5	20	10	5
3	7	11	Alfa	Épsilon	Ró	20	15	5	5
3	7	10	Alfa	Épsilon	Sigma	15	10	15	10
3	6	10	Alfa	Delta	Sigma	5	5	5	5
4	8	9	Beta	Fi	Teta	25	35	25	25
5	8	5	Lambda	Fi	Lambda	12,5	10	12,5	10
5	-	-	Lambda	-	-	5	-	-	5

Resultados

Como resultado do procedimento 3 obteve-se um total de 196 paragens que correspondem a 665 segundos. Conseguiu-se então uma redução de 74% no tempo total de paragens face à simulação de base, cifrando-se a procura não satisfeita em apenas 5 produtos. A comparação entre as demais simulações pode ser consultada na tabela seguinte.

Tabela 33 - Comparação entre as melhores sequências em termos de paragens do tipo 4.

	1ª Sequência	3ª Sequência	Comparação	4ª Sequência	Comparação	5ª Sequência	Comparação
	Tipo 4						
Nº Paragens	339	218	-121	188	-151	196	-143
Tempo parag. (seg)	2541	967	-62%	1004	-60%	665	-74%
% do tempo total	10%	4%		4%		3%	
Procura ã satisfeita	20	8		8		5	

Analisando detalhadamente cada posto de trabalho, verifica-se uma melhoria em todos os postos quer quando comparado com a sequência de base (1ª sequência), quer em comparação com a sequência que apresentava até aqui melhores resultados (3ª sequência).

Tabela 34 - Comparação entre as 4 últimas sequências para cada posto de trabalho.

	1ª Sequência		3ª Sequência		Comparação	4ª Sequência		Comparação	5ª Sequência		Comparação
	Tipo 4					Tipo 4			Tipo 4		
	Nº	Tempo	Nº	Tempo		Nº	Tempo		Nº	Tempo	
Estação 1											
1F	23	129	45	206	60%	34	127	-2%	17	64	-50%
1E	43	164	0	0	-100%	0	0	-100%	0	0	-100%
Estação 2											
2C	56	550	45	315	-43%	37	291	-47%	62	256	-53%
Estação 3											
3T	96	568	115	407	-28%	97	456	-20%	90	318	-44%
3D	14	62	0	0	-100%	0	0	-100%	0	0	-100%
Estação 4											
4F	47	403	0	0	-100%	10	30	-93%	0	0	-100%
Estação 5											
5E	60	665	13	39	-94%	10	100	-85%	27	27	-96%

Concluiu-se que este procedimento permite obter uma redução significativa no tempo de paragens. Se analisarmos ainda a estação 3T que tendo uma carga média de 98%, portanto superior em cerca de 1% à carga considerada ideal (97% do tempo de *takt*) origina desde logo paragens que se cifrarão em cerca de 265 segundos. Nesta perspectiva os 318 segundos de paragem obtidos com este procedimento, nesta estação, aparentam ser razoáveis. Por outro lado o processo de sequenciação é restringido pelo facto de existirem apenas 11 modelos distintos.

5.5.2 Teste 2 – Tentativa de recriação de uma subsecção de uma linha de montagem real

Este segundo teste surge pela necessidade de provar a capacidade da última (e melhor) heurística anteriormente utilizada numa situação que possa efectivamente recriar uma parte de uma linha real de montagem. Enquanto no primeiro teste foram definidos 11 modelos completamente independentes cujos tempos de processamento são variáveis e aleatórios, agora definir-se-ão 4 modelos de base com características bem definidas. Quanto à dimensão da linha de montagem, optou-se por definir 23 postos de trabalho espalhados por 15 estações (subsecção). Numa linha de montagem automóvel normalmente existem *buffers* entre subsecções de forma a garantir a independência das mesmas em relação à restante linha em caso de necessidade de paragem.

Baseado nos princípios da indústria automóvel actual, este teste permitirá ao mesmo tempo verificar a capacidades das heurísticas quando existem em linha diferentes modelos (grande variação) e também várias variantes do mesmo modelo (pequenas variações). Dentro de cada modelo, para a criação das variantes vão ser escolhidos três ou mais factores de diferenciação (opcionais) como:

- Motorização;

- Opcional tecto de abrir;
- Opcional Navegação (GPS);
- Opcional Ar condicionado (AC);

Modelos

Foram criados 4 modelos de base com características bastante distintas conforme documenta a tabela seguinte:

Tabela 35 - Categorias dos modelos para o teste 2.

Categoria	Designação	Características
SUV	Robusty	Veículo com grandes dimensões, que possibilita utilização em estrada ou em terrenos acidentados.
“Roadster”	Sporty	Veículo de médias dimensões, descapotável e com um design desportivo
Familiar	Family	Veículo grande e confortável com vista a transportar uma família.
Compacto	City	Veículo de pequenas dimensões com vista a utilização citadina. Pode ser de 3 ou 5 portas.

Variantes

Utilizando os 4 modelos de base e fazendo variar os opcionais disponíveis para cada um deles obtiveram-se as seguintes 25 versões:

Tabela 36 - Versões para o modelo Robusty.

Modelo Robusty – 6 variantes					
Nº	Designação	Motorização	Tecto de Abrir	Navegação	Nº de lugares
1	Robusty 3.1D Top7	3100cc – Diesel	Sim	Sim	7
2	Robusty 3.1D Open7		Sim	Não	7
3	Robusty 3.1D Open5		Sim	Não	5
4	Robusty 6.0D Luxe7	6000cc – Diesel	Sim	Sim	7
5	Robusty 2.4i High5	2400cc – Gasolina	Sim	Sim	5
6	Robusty 2.4i Low5		Não	Não	5

Tabela 37 - Versões para o modelo Sporty.

Modelo Sporty – 3 variantes					
Nº	Designação	Motorização	Tipo de Capota	Navegação	Ar condicionado
7	Sporty 1.8ti Base	1800 cc – Gasolina	Lona	Não	Não
8	Sporty 1.8ti Sun+		Rígida	Sim	Não
9	Sporty 3.6ti Cool	3600 cc – Gasolina	Rígida	Sim	Sim

Tabela 38 - Versões para o modelo Family.

Modelo Family – 6 variantes					
Nº	Designação	Motorização	Tecto de Abrir	Navegação	Ar condicionado
10	Family 1.6i Confort	1600 cc – Gasolina	Não	Não	Sim
11	Family 1.6i Navi		Não	Sim	Não
12	Family 1.7d Basic	1700 - Diesel	Não	Não	Sim
13	Family 1.7d Trendy		Sim	Sim	Sim
14	Family 2.5d Top	2500 - Diesel	Não	Sim	Sim
15	Family 2.5d Lux		Sim	Sim	Sim

Tabela 39 - Versões para o modelo City.

Modelo City – 10 variantes					
Nº	Designação	Carroçaria	Motorização	Airbags (2 ou 4)	Ar condicionado
16	City 1.0i Base	3 Portas	1000cc – Gasolina	2	Não
17	City 1.2i Beet		1200 cc – Gasolina	2	Não
18	City 1.2i Safe			2	Sim
19	City 1.3d Live		1300 cc – Diesel	2	Não
20	City 1.3d Best			4	Sim
21	City 1.0i Base5	5 Portas	1000cc – Gasolina	2	Não
22	City 1.2i Beet5		1200 cc – Gasolina	2	Não
23	City 1.2i Safe5			2	Sim
24	City 1.3d Live5		1300 cc – Diesel	2	Não
25	City 1.3d Best5			4	Sim

Tempo para produção

Definiu-se como instante temporal, para testar as diferentes sequências, o correspondente a um turno de trabalho, ou sejam, 8 horas. Neste período não estão incluídas as paragens habituais numa linha de montagem quer para descanso quer para as refeições (paragens programadas).

Tabela 40 - Tempo para produção no teste 2.

Tempo de trabalho		8h × 60 min	480 min
Nº paragens			3
Tempo paragem	Paragem 1	Paragem 2	Paragem 3
	7 min	30 min	7 min

Procura

A procura foi definida tendo em conta o mercado automóvel europeu actual. Os automóveis compactos são os mais procurados, seguidos dos destinados à família (Family). Os SUV representam uma cota mais pequena enquanto os “roadsters” são destinados apenas a uma minoria devido às suas características (motores unicamente a gasolina, apenas dois lugares, ...) No anexo C, a tabela 60 apresenta a divisão da procura total (220 produtos) pelas diversas versões.

Takt-time

Definidas a procura e o tempo útil para produção, o *takt-time* para a simulação foi calculado da seguinte forma:

$$Takt - time = \frac{Procura\ total}{Tempo\ útil} = \frac{220\ unid.}{480\ min \times 60} \approx 131\ s.$$

Postos de Trabalho

Para cada um dos postos de trabalho foram definidas operações/processos com base na montagem real de um automóvel. As operações escolhidas permitem recriar alguns dos

aspectos determinantes numa linha de montagem como: operações consecutivas na mesma zona de trabalho, processos automáticos e manuais e ainda as discrepâncias no processo de modelo para modelo.

Esta disponível no anexo C uma tabela (tabela 59) com a descrição do processo de cada posto de trabalho, do tipos de operações efectuadas e a variação na carga de trabalho para cada modelo.

Cargas de Trabalho

Para cada posto de trabalho e para cada variante foram então definidas cargas de trabalho. O tempo de processamento para o produto depende das características do mesmo. Por exemplo, tem-se para o posto de trabalho 9E:

Tabela 41 – Operações para o posto 9E.

Estação Postos de Trabalho	Zona de Trabalho	Descrição do processo	Tipo de Operações	Variações
9E	Esquerda	Enchimento do ar condicionado e óleo do motor.	7% Manuais 93% Automáticas	Maior tempo de processamento nos modelos com AC. Ordem crescente do tempo para enchimento do óleo: city, sporty, family, robusty.

Tabela 42 - Carga e tempo de processamento para cada versão no posto 9E.

Robusty	Sporty			Family						City				
1 a 6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16/21	17/22	18/23	19/24	20/25
98%	86%	86%	92%	92%	90%	92%	92%	92%	92%	82%	82%	87%	82%	87%
128	113	113	121	121	118	121	121	121	121	108	108	114	108	114

O modelo Robusty apresenta cargas constantes pois todos os modelos têm o opcional ar condicionado. No Sporty é notória a diferença na versão COOL (nº9) que possui ar condicionado, enquanto no Family apenas a versão NAVI (nº11) não proporciona este extra. No modelo City apenas as versões SAFE (nº18), SAFE5 (nº23), BEST (nº23) e BEST5 (nº25) têm este opcional.

No anexo C tabela 61 estão disponíveis as cargas de trabalho para todas as versões.

1ª Sequência – Ordem Alfabética

Tal como no primeiro teste, apresentado anteriormente, a sequência utilizada para a simulação de base partiu de uma ordenação alfabética dos modelos. Cada modelo independentemente da categoria em que se insere ou da motorização tem uma versão.

A ordenação terá em conta apenas a designação da versão permitindo com isto obter uma sequência aleatória. A tabela seguinte (lado esquerdo) ilustra a correspondência entre os

modelos e a versão que os designa, enquanto a do lado direito apresenta a forma como foi conseguida a primeira sequência.

Tabela 43 - Correspondência modelo - versão.

Nº	Versão	Modelo Correspondente
1	Top7	Robusty 3.1D Top7
2	Open7	Robusty 3.1D Open7
3	Open5	Robusty 3.1D Open5
4	Luxe7	Robusty 6.0D Luxe7
5	High5	Robusty 2.4i High5
6	Low5	Robusty 2.4i Low5
7	Sun+	Sporty 1.8ti Sun
8	Sun+	Sporty 1.8ti Sun+
9	Cool	Sporty 3.6ti Cool
10	Confort	Family 1.6i Confort
11	Navi	Family 1.6i Navi
12	Basic	Family 1.7d Basic
13	Trendy	Family 1.7d Trendy
14	Top	Family 2.5d Top
15	Lux	Family 2.5d Lux
16	Base	City 1.0i Base
17	Beet	City 1.2i Beet
18	Safe	City 1.2i Safe
19	Live	City 1.3d Live
20	Best	City 1.3d Best
21	Base5	City 1.0i Base5
22	Beet5	City 1.2i Beet5
23	Safe5	City 1.2i Safe5
24	Live5	City 1.3d Live5
25	Best5	City 1.3d Best5

Tabela 44 - Obtenção da 1ª sequência (2º teste).

Nº	Versão	Procura	Repetições
24	Live5	23	1
12	Basic	22	7
22	Beet5	15	2
3	Open5	13	1
13	Trendy	13	
10	Confort	12	2
19	Live	12	
20	Best	10	1
7	Sun+	9	1
14	Top	9	
16	Base	9	
21	Base5	9	
2	Open7	8	1
6	Low5	7	1
11	Navi	7	
17	Beet	6	1
25	Best5	6	
8	Sun+	5	1
15	Lux	5	
1	Top7	4	1
18	Safe	4	
23	Safe5	4	
4	Luxe7	3	1
5	High5	3	
9	Cool	2	2

Resultados

Para esta primeira sequência obteve-se como resultados: 619 paragens do tipo 4 num total de 4468 segundos. Embora sejam números bastante elevados são perfeitamente justificáveis pelo tipo de sequência utilizada (totalmente aleatória). Os detalhes estão apresentados na tabela seguinte.

Tabela 45 - Paragens do tipo 4 na 1ª simulação (teste 2)

	1ª Sequência
	Tipo 4
Nº Paragens	619
Tempo Paragens (seg)	4468
% do tempo total	16%
Procura ã satisfeita	34

Analisando detalhadamente cada posto de trabalho verificou-se que o posto crítico (*bottleneck*) deste segundo teste seria o posto 4F. Não só por apresentar um carga média de trabalho superior aos 97% como por ser a causadora da maioria das paragens (116 paragens

perfazendo 1250 segundos, correspondentes a cerca de 29% do total). A tabela com dados relativos às cargas e paragens de cada posto de trabalho está disponível no anexo C (tabela 62)

2ª Sequência – Procedimento 3

No decorrer do primeiro teste o procedimento 3 foi o que garantiu melhores resultados. Passou-se por isso à utilização do mesmo usando como base o posto crítico encontrado, o 4F. Segue-se uma tabela na qual estão apresentadas as versões e a sua ordem de carga. No anexo C é possível consultar a tabela detalhada (tabela 63) com as cargas e tempos de processamento que deram origem a esta ordem de cargas.

Tabela 46 - Ordens de carga do posto de trabalho 4F (teste 2).

Versão	Robusty Top7	Robusty Open7	Robusty Open5	Robusty Luxe7	Family Top	Family Lux	Family Basic	Family Trendy	Robusty High5	Robusty Low5	Sporty Cool	City Live
Ordem de Carga	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
City Best	City Live5	City Best5	Family Comfort	Family Navi	Sporty Sun	Sporty Sun+	City Base	City Beet	City Safe	City Base5	City Beet5	City Safe5
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

A sequência foi obtida juntando sempre as versões com menor, média (através da mediana do conjunto) e maior ordem de carga conforme ilustra a tabela seguinte.

Tabela 47 - Obtenção da 2ª sequência pelo procedimento 3 (teste 2)

Ordens de carga			Modelo			Procura ñ satisfeita			Repetição possível	Carga Média
1	13	25	Robusty Top7	City Best	City Safe5	4	10	4	4	100%
2	13	24	Robusty Open7	City Best	City Beet5	8	6	15	6	100%
2	14	24	Robusty Open7	City Live5	City Beet5	2	23	9	2	100%
3	14	24	Robusty Open5	City Live5	City Beet5	13	21	7	7	100%
3	14	23	Robusty Open5	City Live5	City Base5	6	14	9	6	100%
4	14	23	Robusty Luxe7	City Live5	City Base5	3	8	3	3	100%
5	14	22	Family Top	City Live5	City Safe	9	5	4	4	98%
5	14	21	Family Top	City Live5	City Beet	5	1	6	1	98%
5	12	21	Family Top	City Live	City Beet	4	12	5	4	98%
6	15	21	Family Lux	City Best5	City Beet	5	6	1	1	98%
6	12	20	Family Lux	City Live	City Base	4	8	9	4	98%
7	15	20	Family Basic	City Best5	City Base	22	5	5	5	96%
7	12	19	Family Basic	City Live	Sporty Sun+	17	4	5	4	98%
7	11	19	Family Basic	Sporty Cool	Sporty Sun+	13	2	1	1	101%
7	11	18	Family Basic	Sporty Cool	Sporty Sun	12	1	9	1	101%
7	10	18	Family Basic	Robusty Low5	Sporty Sun	11	7	8	7	101%
7	16	18	Family Basic	Family Comfort	Sporty Sun	4	12	1	1	98%
7	9	17	Family Basic	Robusty High5	Family Navi	3	3	7	3	103%
8	16	17	Family Trendy	Family Comfort	Family Navi	13	11	4	4	100%
8	16	-	Family Trendy	Family Comfort	-	9	7	-	7	102%
8	-	-	Family Trendy	-	-	2	-	-	2	109%

Resultados

Os resultados foram conforme esperado bastante melhores: 412 paragens do tipo 4 num total de 1398 segundos, o que representa uma redução de cerca de 70% no tempo total de paragens. A tabela seguinte apresenta os resultados para as duas simulações e a respectiva comparação.

Tabela 48 - Comparação entre as 2 sequências em termos de paragens do tipo 4.

	1ª Sequência	2ª Sequência	Comparação
	Tipo 4		
Nº Paragens	619	412	-207
Tempo Paragens (seg)	4468	1398	-69%
% do tempo total	16%	5%	
Procura ã satisfeita	34	11	

Analisando detalhadamente cada posto de trabalho verifica-se que:

- A maioria dos postos de trabalho com uma carga média inferior a 95% viu os seus tempos de paragens serem muito reduzidos ou mesmo extintos.
- Dez de entre os vinte e três postos de trabalho viram as paragens reduzidas a zero.
- A menor redução no tempo de paragens verifica-se na estação crítica (4F). Esta estação foi considerada como crítica porque não só causava um maior número de paragens mas também porque apresenta uma carga média superior aos 97% vistos como limite máximo desejado. Os 100% (aproximados) de carga média desta estação condicionam a partida a sequenciação visto que as paragens serão inevitáveis.

$$\text{Tempo minimo paragem} = (99,5\% - 97\%) \times 8 \times 60 \times 60 = 720 \text{ seg.}$$

Os 732 segundos de paragem no posto de trabalho 4F representam um valor muito próximo do melhor valor possível.

A tabela com os dados respectivos às paragens dos diversos postos de trabalho pode ser consultada no anexo C (tabela 64).

Considerando o tempo total de paragens conseguido (1398 segundos) com este procedimento de melhoria e tendo em conta que destes 720 segundos são inevitáveis obtêm-se apenas 678 segundos de tempo de paragens a melhorar (cerca de 2% do tempo total para produção).

5.5.3 Análise dos resultados obtidos nos testes 1 e 2

Após a realização dos dois testes ficou demonstrada a possibilidade de redução do tempo de paragens, devido a sobrecargas, em cerca de 70% face a uma sequência inicial (ordem alfabética) na qual não foi tido em conta qualquer procedimento com vista à melhoria. Se se transformar estes valores em procura não satisfeita, ao fim de um turno de trabalho no qual

seria suposto concluir 220 produtos, significa um ganho de 24 unidades, ou seja consegue-se passar de 34 para apenas cerca de 10 unidades . Estes valores têm ainda em conta uma pequena folga para simples imprevistos que podem ocorrer. Esta folga cifra-se precisamente em 3% do tempo de takt, visto que o limite considerado aponta para os 97%. O valor das paragens poderá ser então menor caso não se verifiquem este tipo de interferências.

Nota final : Como apoio à presente dissertação foi criado um cd-rom no qual estão inseridos a versão final do simulador, assim como os dois exemplos de aplicação acima apresentados (teste 1 e teste 2). A utilização de qualquer destes ficheiros requer que previamente seja activada a permissão para correr Macros (em Opções do Excel).

6. Conclusões e Perspectivas Futuras

6.1 Conclusões

Em forma de conclusão deste projecto será importante realçar alguns pontos que se revelaram bastante interessantes e cuja aplicação se manifesta bastante promissora:

Em primeiro lugar, a forma como um simples aplicativo informático permite simular o comportamento de uma linha mista de montagem em resposta a uma determinada sequência de modelos. O aplicativo criado permite ao utilizador obter um relatório detalhado sobre as paragens não programadas que ocorrerão. Mais concretamente o utilizador terá à sua disposição vários elementos para análise: uma listagem, com recurso a diferentes cores que definem gamas de cargas de trabalho, permitirá à partida uma visualização tipo “panorama geral” - na qual são exibidos para cada momento da jornada de trabalho os modelos a montar num determinado posto de trabalho o seu tempo de processamento e a carga que representa face à velocidade de linha selecionada -; uma tabela que apresentará dados concretos para cada paragem, como a hora, a causa ou o tempo de paragem; uma outra tabela resumo na qual podem ser consultados os valores relacionados com o número de paragens ou o tempo total de paragens quer para a totalidade da linha quer para um posto em particular. Serão disponibilizados ainda os gráficos de cargas de trabalho para os mesmos postos que surgem como uma forma de verificar a correcta homogeneização do trabalho do operador durante o turno produtivo. Com este conjunto de informações é possível ter em mãos uma informação prévia sobre as situações que potencial vão ocasionar perdas de eficiência e produtividade. Está pois garantida uma ferramenta de teste que facilita a previsão de paragens de linha e aumenta a capacidade de tomar contramedidas em tempo útil.

Outra questão em destaque prende-se com o processo de sequenciação, que embora se trate de um processo aplicável no curto prazo deve ser alvo constante de atenção por parte dos agentes de decisão pois permite melhorias significativas com um custo de estudo e implementação bastante baixo. Mesmo nos dias de hoje este processo não é tido em conta em algumas empresas, sendo a sequência escolhida empiricamente ou de acordo com a experiência adquirida pelo decisor no passado. A escolha entre uma sequência bem conseguida, na qual são evitados períodos de sobrecarga (sequência de modelos de maior complexidade) e “tempos mortos” (sequência de modelos mais simples) garantindo uma maior homogeneidade da carga de trabalho, resultante de se intercalar modelos mais e menos complexos, e outra mais despreocupada que não tenha em conta o factor carga de trabalho pode significar uma diferença importante na quantidade de produtos obtidos ao final de um turno de trabalho.

Um bom exemplo está patente neste trabalho e pode resumir-se na diferença de resultados obtida pela implementação de heurísticas para construção de sequências. Em qualquer um dos testes feitos, utilizando uma heurística simples que não requer grande tempo de processamento e de aplicação, obtiveram-se resultados bastante promissores.

É também de referir que foram realizados apenas dois testes, ou seja apenas duas utilizações da melhor heurística conseguida, que embora tentem recriar duas situações bastante díspares em termos quer de processos quer de características dos modelos a montar, não passam de um estudo preliminar do interesse em prosseguir o desenvolvimento da heurística proposta. É por isso possível que para linhas de montagem com características muito próprias ou com produtos distintos os resultados obtidos não sejam tão consistentes.

Finalmente, de notar também, é o baixo custo de concepção e utilização de toda esta solução. Fica demonstrado que não só com ferramentas dispendiosas ou softwares complexos se conseguem criar plataformas de gestão e de apoio à decisão. Com efeito, tendo como base o Microsoft Excel 2007 e a linguagem de programação VBA conseguiu-se implementar um aplicativo bastante flexível, de fácil utilização e como tal ao alcance dos agentes de decisão sem necessidade de tempo prévio de aprendizagem.

6.2 Perspectivas Futuras

Para futuro enriquecimento deste projecto seria fundamental a inclusão das seguintes funcionalidades:

- Automatização da aplicação da heurística com vista à obtenção de uma sequência otimizada. Esta nova função permitiria dotar o aplicativo criado de uma rotina operativa que de forma automática proporia ao utilizador sucessivas sequências que seriam melhoradas de um modo consecutivo, ou seja cada sequência seria melhor do que a precedente.
- Criação de um método para alocação do operador chave que permitiria fazer face a uma das lacunas não exploradas neste trabalho. Com efeito, as paragens do tipo 2 e 3 que se relacionam com as paragens por falta de margem de manobra do operador para finalizar o seu trabalho devido às restrições, quer da linha em si quer do processo de montagem, não são alvo de análise desta ferramenta. Uma variante que permitisse identificar atempadamente a necessidade de inclusão de um operador polivalente para prestar auxílio em qualquer um dos postos de trabalho, contribuiria para que esta ferramenta respondesse de forma mais integral a toda esta problemática.

Referências e Bibliografia

- Bard, J., Shtub, A., & Joshi, S. (1994). Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. *International Journal of Production Research* 32 , pp. 2431–2454.
- Bautista, J., & Cano, J. (2008). Minimizing work overload in mixed-model assembly lines. *Int. J. Production Economics* 112 , pp. 177–191.
- Baybars, İ. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*, Vol. 32, No. 8 , pp. 909-932.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 , pp. 694–715.
- Becker, C., & Scholl, A. (2009). Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure. *European Journal of Operational Research* 199 , pp. 359–374.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing : Which model to use when? *International journal of production economics* 11(2) , pp. 509-528.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing Mixed-Model Assembly Lines:Survey, classification and model critique. *European journal of operational research* 192(2) , pp. 349-373.
- Boysen, N., Kiel, M., & Scholl, A. (2010). Sequencing Mixed-Model Assembly Lines to Minimize the Number of Work Overload Situations. *International Journal of Production Research* 48/11 , pp. 3173-3191.
- Carvalho, A. (2008). *Programação com Excel para Economia e Gestão 2ª ed.* FCA - Editora de Informática, Lda.
- Carvalho, A. (2009). *Programação com Excel para Economia e Gestão vol. 2.* FCA - Editora de Informática, Lda.
- Håkansson, J., Skoog, E., & Eriksson, K. (2010). A review of assembly line balancing and sequencing including line layouts. *European journal of operational , [In Press, Corrected Proof]*.
- Kim, S., & Jeong, B. (2007). Product sequencing problem in Mixed-Model Assembly Line to minimize unfinished works. *Computers & Industrial Engineering* 53 , pp. 206–214.
- Monden, Y. (1998). *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time* 3. ed. Norcross, Ga.: Engineering and Management.
- Pan, H., & Sarker, B. (2001). Designing a mixed-model, open-station assembly line using mixed-integer programming. *Journal of Operational Research Society* 52 , pp. 545–558.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing of assembly lines*. Heidelberg: Physica-Verlag.

SCHOLL, A., KLEIN, R., & DOMSCHKE, W. (1998). Pattern Based Vocabulary Building for Effectively Sequencing Mixed-Model Assembly Lines. *Journal of Heuristics* 4 - 1998 , pp. 359–381.

Solnon, C., Cung, V., Nguyen, A., & Artigues, C. (2008). The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial casestudy of the ROADEF'2005 challenge problem. *European journal of operational research* 191 , pp. 912-927.

Anexo A : Figuras e descrições dos formulários do aplicativo

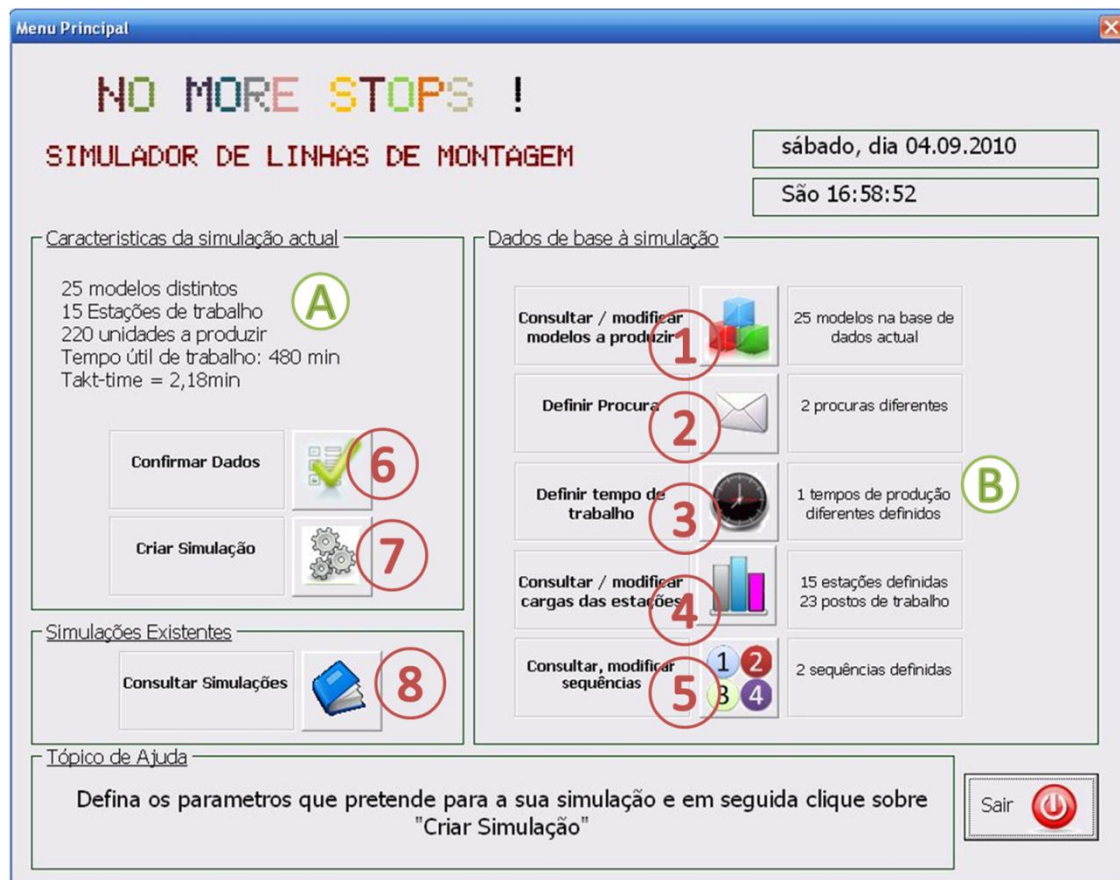


Figura 12 - Imagem do menu principal, com anotações.

Tabela 49 - Legenda das anotações da figura 13

Botões Principais		Informações principais	
De 1 a 8 permitem aceder aos seguintes formulários:		A	Dados seleccionados para a simulação actual
1	Produtos	B	Informação sobre a totalidade da base de dados
2	Procura		
3	Tempo de trabalho		
4	Cargas de Estações		
5	Sequências		
6	Definir dados		
7	Simulação		
8	Consulta de simulações		

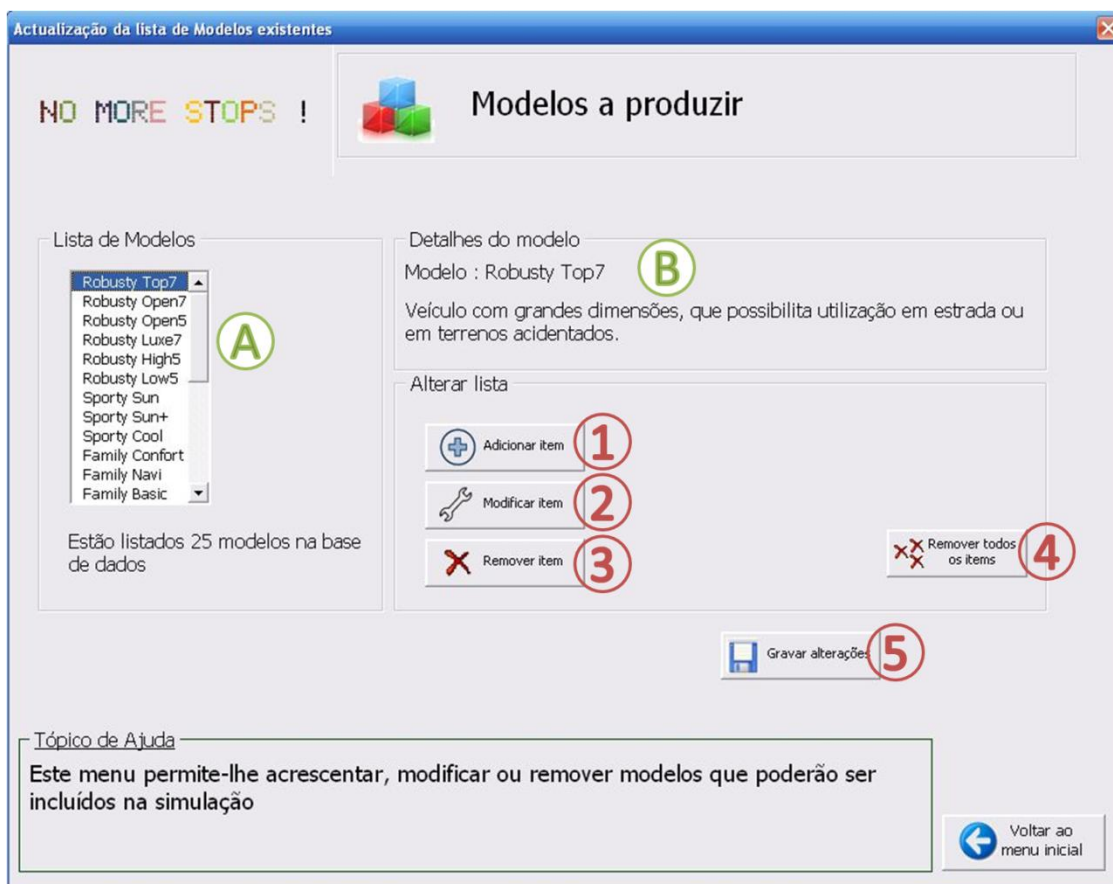


Figura 13 - Imagem do menu modelos a produzir, com anotações.

Tabela 50 - Legenda das anotações da figura 14

Botões Principais		Informações principais	
1	Adicionar um novo modelo	A	Listagem da totalidade dos modelos
2	Modificar um modelo existente	B	Informação sobre o modelo seleccionado na lista (designação e descrição)
3	Remover um dos modelos		
4	Limpar a lista actual de modelos		
5	Gravar as alterações efectuadas		

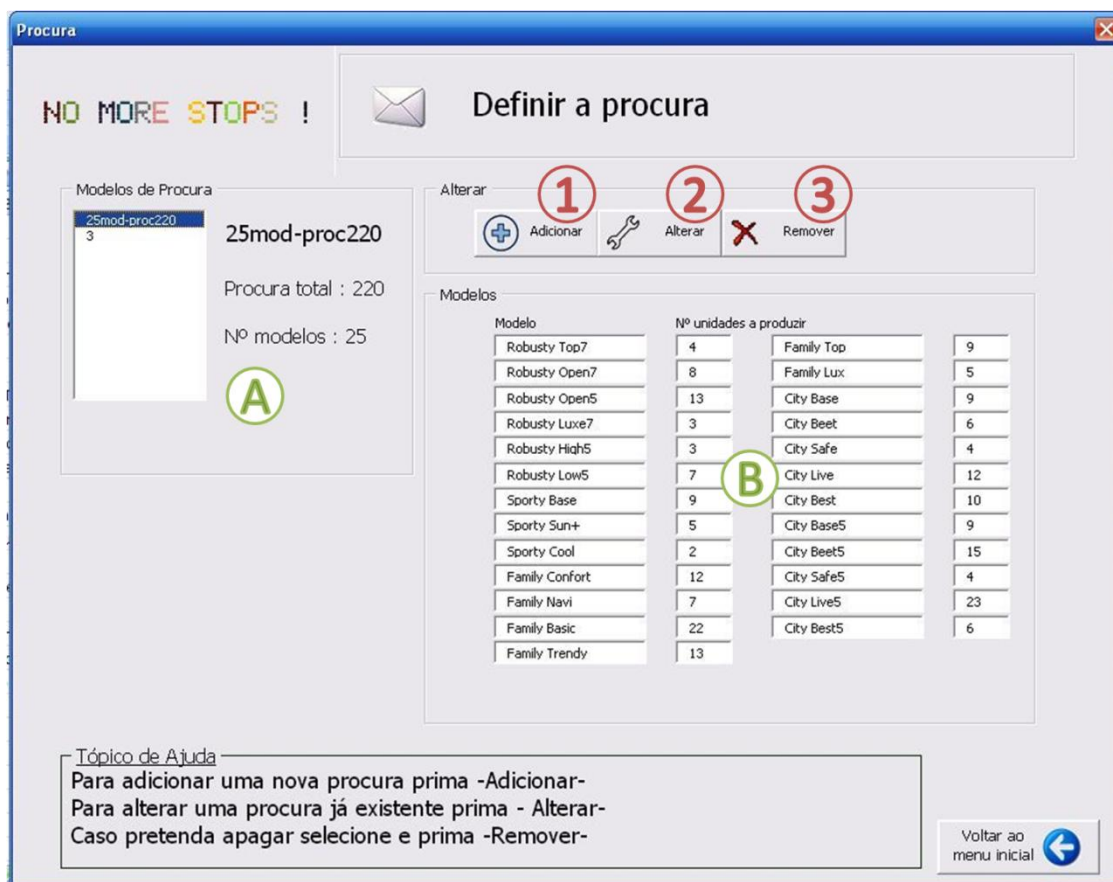


Figura 14 - Imagem do menu definir a procura, com anotações.

Tabela 51 - Legenda das anotações da figura 15

Botões Principais		Informações principais	
1	Adicionar nova procura	A	Listagem e detalhes gerais sobre a procura
2	Alterar uma procura existente	B	Informação sobre a procura (modelos e quantidades)
3	Remover uma das procuras		

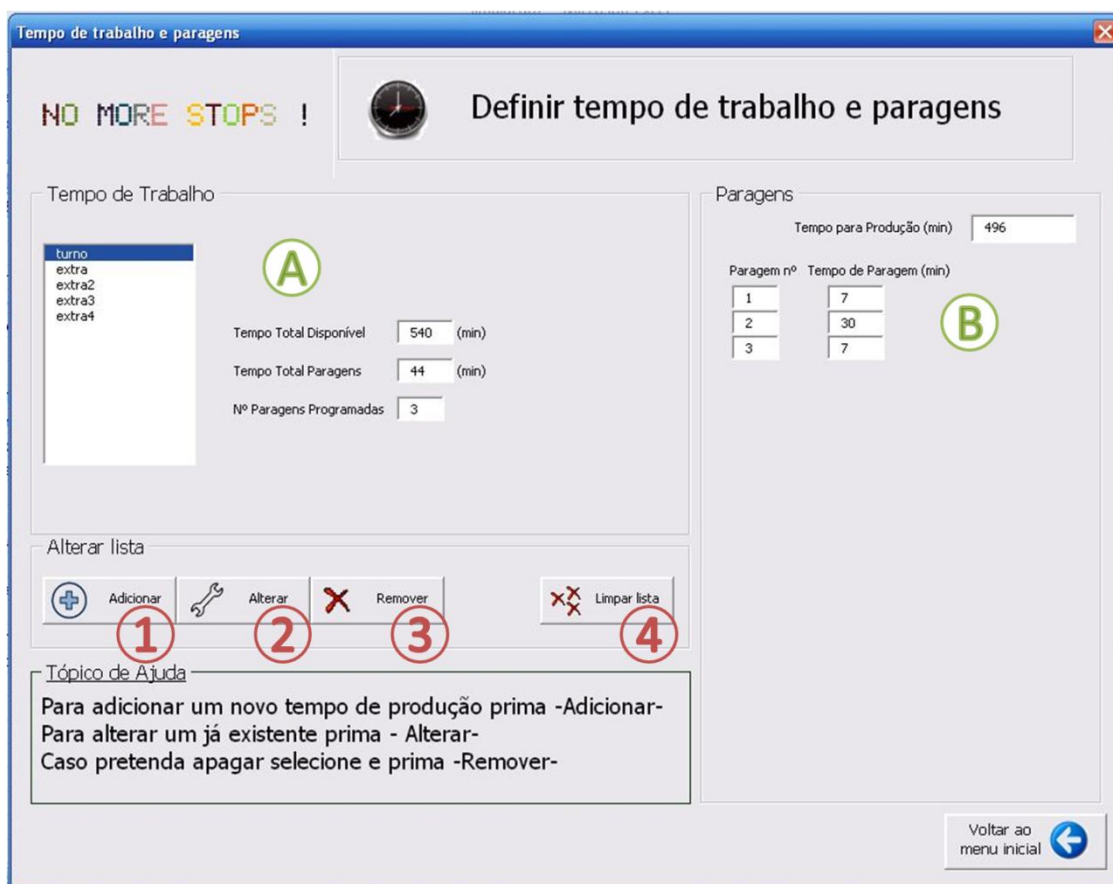


Figura 15 - Imagem do menu definir tempo de trabalho e paragens, com anotações.

Tabela 52 - Legenda das anotações da figura 16

Botões Principais		Informações principais	
1	Adicionar novo tempo de trabalho e paragens	A	Listagem e detalhes gerais sobre os tempos de trabalho
2	Alterar um tempo de trabalho ou as paragens	B	Informação sobre o tempo para produção, o número de paragens e o tempo de cada uma delas.
3	Remover um dos tempos de trabalho definidos		
4	Eliminar todos os tempos definidos		

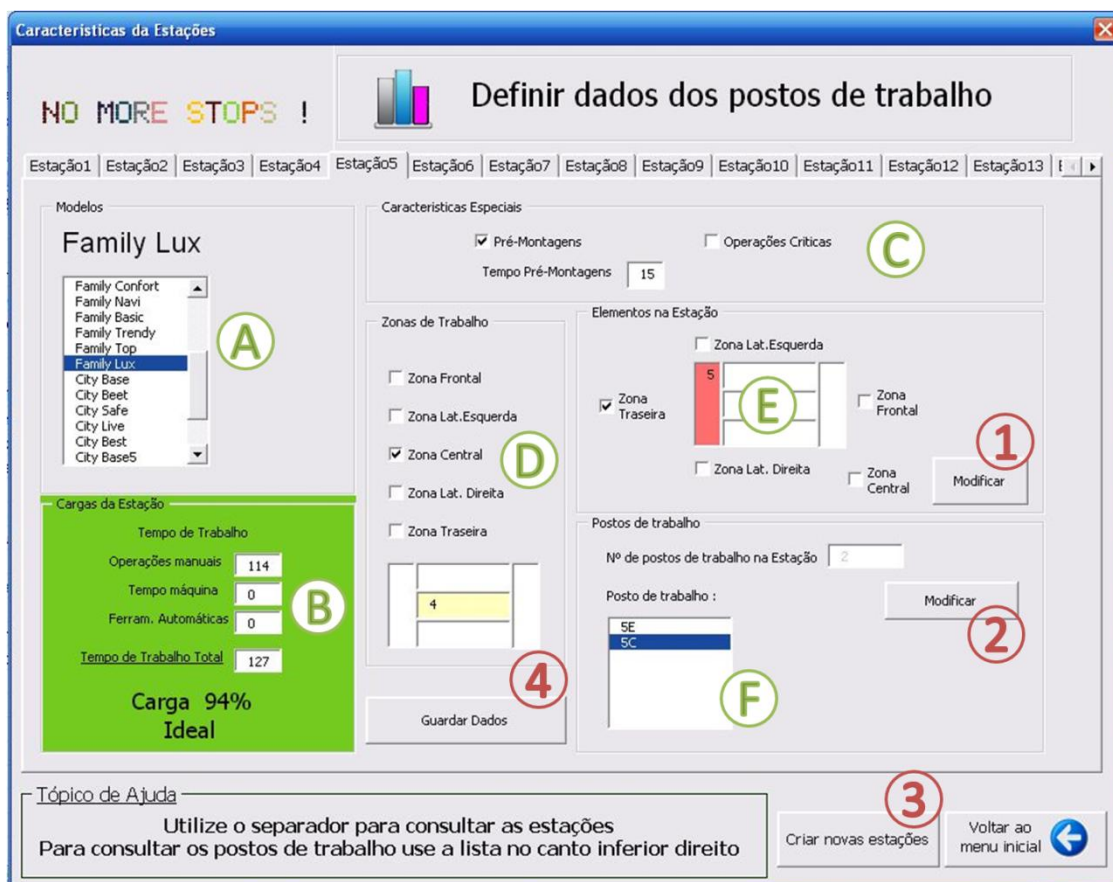


Figura 16 - Imagem do menu definir cargas de trabalho, com anotações.

Tabela 53 - Legenda das anotações da figura 17.

Botões Principais		Informações principais	
1	Definir os elementos físicos da estação	A	Listagem dos modelos
2	Criar ou eliminar postos de trabalho	B	Informação sobre o tempo de trabalho e os 3 tipos de operações em que subdivide.
3	Criar novas estações no fim das existentes	C	Dados sobre a existência ou não de pré-montagens (respectivo tempo) e operações críticas
4	Guardar alterações efectuadas	D	Definição das zonas de trabalho para o posto seleccionado.
		E	Elementos nas zonas de trabalho da estação.
		F	Listagem dos postos de trabalho.

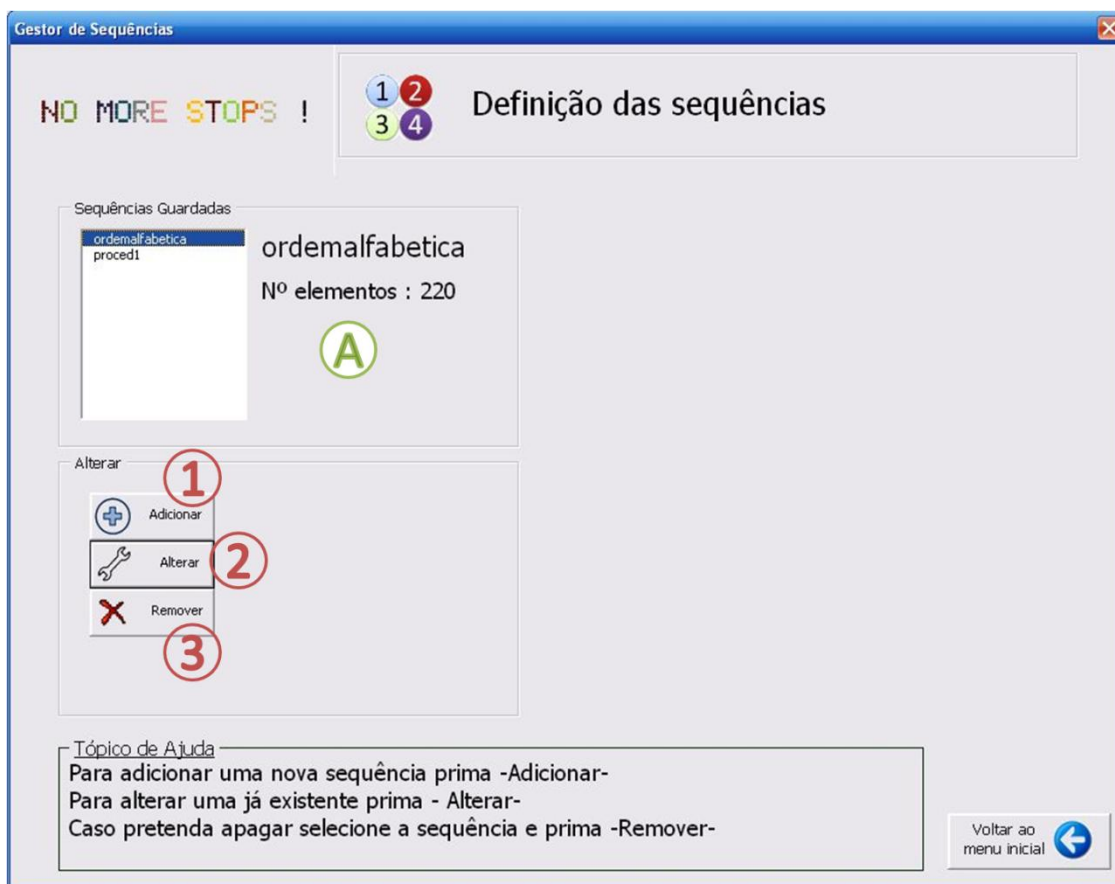


Figura 17 - Imagem do menu definição das sequências, com anotações.

Tabela 54 - Legenda das anotações da figura 18.

Botões Principais		Informações principais	
1	Adicionar sequência	A	Listagem das sequências guardadas
2	Alterar sequência existente		
3	Remover uma das sequências		

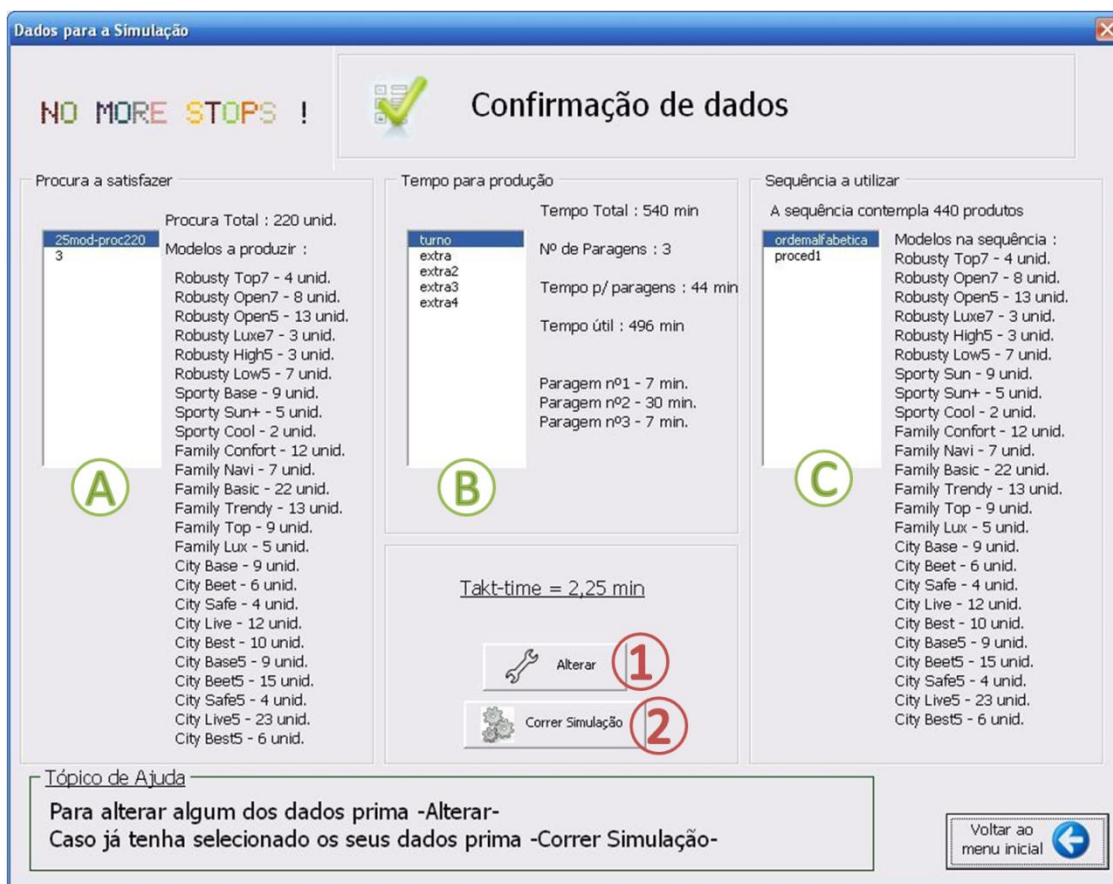


Figura 18 - Imagem do menu confirmar dados, com anotações.

Tabela 55 - Legenda das anotações da figura 19.

Botões Principais		Informações principais	
1	Alterar dados seleccionados	A	Listagem das procuras introduzidas
2	Ir para menu da simulação	B	Listagem dos tempos de produção definidos.
		C	Listagem das sequências guardadas

SIMULAÇÃO

Correr a simulação

Dados da Simulação

A

Tempos

Produção total	<input type="text" value="220"/>	Tempo Total	<input type="text" value="540"/> (min)
Takt-time	<input type="text" value="2:25"/>	Tempo Paragens	<input type="text" value="44"/> (min)
Nº Estações	<input type="text" value="15"/>	Tempo Util p/ produção	<input type="text" value="496"/> (min)
		Nº de Paragens	<input type="text" value="3"/>

Horario de Arranque h

Paragem nº 1 - 7min h

Paragem nº 2 - 30min h

Paragem nº 3 - 7min h

Modelo Qt a produzir

Robusty Top7	4	Robusty LowS	7	Family Navi	7	City Base	9	City Base5	9
Robusty Open7	8	Sporty Base	9	Family Basic	22	City Beet	6	City Beet5	15
Robusty OpenE	13	Sporty Sun+		Family Trendy	13	City Safe	4	City Safe5	4
Robusty Luxe7	3	Sporty Cool	2	Family Top	9	City Live	12	City Live5	23
Robusty HighS	3	Family Confort	12	Family Lux	5	City Best	10	City Best5	6

Horario de Final h

Designação para a simulação

Simular ▶

Voltar ao menu inicial ◀

Figura 19 - Imagem do menu correr simulação, com anotações.

Tabela 56 - Legenda das anotações da figura 20.

Botões Principais		Informações principais	
1	Modificar dados relativos à hora de arranque da simulação e das paragens.	A	Dados gerais definidos para simulação
2	Correr a simulação	B	Informação sobre a hora de arranque e horário para cada uma das paragens.
		C	Informação sobre os modelos e quantidades a produzir
		D	Horário final e designação da simulação.

Anexo B : Tabelas relativas ao teste 1

Tabela 57 - Tempos de processamento e cargas de trabalho para todos os postos (teste 1)

Posto de Trabalho	<u>1E</u>		<u>2C</u>		<u>3T</u>		<u>3D</u>		<u>4F</u>		<u>5E</u>	
Modelos	Tempo total	Carga	Tempo total	Carga	Tempo total	Carga	Tempo total	Carga	Tempo total	Carga	Tempo total	Carga
<u>Alfa</u>	137	109%	164	130%	142	113%	144	114%	156	124%	158	125%
<u>Beta</u>	123	98%	109	87%	127	101%	107	85%	123	98%	125	99%
<u>Delta</u>	114	90%	124	98%	122	97%	121	96%	107	85%	113	90%
<u>Fi</u>	89	71%	84	67%	118	94%	82	65%	91	72%	64	51%
<u>Teta</u>	115	91%	125	99%	115	91%	106	84%	113	90%	124	98%
<u>Gama</u>	156	124%	128	102%	156	124%	140	111%	141	112%	127	101%
<u>Sigma</u>	90	71%	102	81%	115	91%	86	68%	94	75%	93	74%
<u>Épsilon</u>	119	94%	107	85%	122	97%	112	89%	110	87%	119	94%
<u>Ró</u>	59	47%	104	83%	105	83%	71	56%	70	56%	61	48%
<u>Lambda</u>	105	83%	125	99%	125	99%	108	86%	105	83%	115	91%
<u>Tau</u>	139	110%	140	111%	153	121%	153	121%	160	127%	159	126%

Tabela 58 - Tempos de processamento, cargas e ordens de carga para o posto 3T

Modelo	Tempo de Operações (seg.)	Carga de trabalho	Ordem de Carga	Procura
Alfa	142	113%	3	20
Beta	127	101%	4	25
Delta	122	97%	6	10
Fi	118	94%	8	35
Teta	115	91%	9	25
Gama	156	124%	1	5
Sigma	115	91%	10	15
Épsilon	122	97%	7	20
Ró	105	83%	11	15
Lambda	125	99%	5	25
Tau	153	121%	2	5

Anexo C : Tabelas relativas ao teste 2

Tabela 59 - Descrição das operações definidas para cada posto de trabalho (teste 2).

Estação Postos de Trabalho	Zona de Trabalho	Descrição do processo	Tipo de Operações	Variações
Estação 1				
1F	Frente	Roteamento de cablagens com vista à inserção do motor.	100% Manuais	Maior complexidade nos motores diesel e opção AC.
Estação 2				
2DF	Direita e Frente	Manuseamento do manipulador responsável pela inserção do motor.	100% Automáticas	Mais demorada nos motores de maior cilindrada.
2EF	Esquerda e Frente	Apoio ao manuseamento e apontar de parafusos	75% Automáticas 25% Manuais	Mais demorada nos motores de maior cilindrada. Apontar 4 parafusos no city e sporty e 8 no family e robusty.
Estação 3				
3D	Direita e Frente	Aperto dos parafusos do motor e roteamento de cablagens	65% Ferramentas Automáticas 35% Manuais	Apenas 4 apertos no city e sporty. 8 Apertos nos restantes. Roteamento mais complexo quanto maior a cilindrada.
3E	Esquerda e Frente	Colocação da bateria no carro e ligações	80% Manuais 20% Ferramentas automáticas	Baterias das variantes a gasolina e opção AC mais complicada de montar. Ligações idênticas em todos os modelos.
Estação 4				
4F	Frente	Colocação e ligação das tubagens do óleo no motor. Colocação do filtro de óleo e combustível.	100% Manuais	3 tubos no carros diesel (baixa cilindrada) e 5 (alta cilindrada) e 1 apenas nos carros a gasolina (baixa cilindrada) e (alta cilindrada). Filtros de combustível apenas nos modelos diesel.
Estação 5				
5E	Esquerda	Colocação dos bancos no interior do veículo e cintos de segurança.	100% Manuais	Tempo menor no Sporty (apenas 2 bancos e 2 cintos). Tempo aumenta por esta ordem (City 3P, City 5P, Family, Robusty 5L, Robusty 7L)
5C	Centro	Trabalhando dentro do carro faz o posicionamento dos bancos e cintos.	100% Manuais	Tempo menor no Sporty (apenas 2 bancos e 2 cintos). Tempo aumenta por esta ordem (City 3P, City 5P, Family, Robusty 5L, Robusty 7L)
Estação 6				
6C	Centro	Trabalha dentro do carro e faz o aperto dos bancos e dos cintos de segurança	20% Manuais 80% Ferramentas Automáticas	A ordem de cargas de trabalho é igual à da estação anterior
Estação 7				
7C	Centro	Pré-montagem e colocação e aperto dos airbags.	84% Manuais 16% Ferramentas Automáticas (13% Pré-montagem)	10 Airbags no Robusty, 8 no family, 4 no sporty e variável no city (2 ou 4)

Estudo e teste das sequências de modelos em linhas mistas de montagem

Estação 8				
8DT	Direita e traseira	Colocação do tampão e Enchimento de metade do depósito de combustível.	12% Manuais 88% Automáticas	Tampão automático no Robusty e Sporty (mais complexo) e de mola nos restantes dois (mais simples). Combustível: 40L no Robusty, 30L no Family/Sporty e 20L no City
Estação 9				
9E	Esquerda	Enchimento do ar condicionado e óleo do motor.	7% Manuais 93% Automáticas	Maior tempo nos modelos com AC. Ordem crescente do tempo para enchimento do óleo: city, sporty, family, robusty.
Estação 10				
10E	Esquerda	Testes eléctricos efectuados no interior do carro.	22% Manuais 78% Automáticas	Ordem crescente para testes eléctricos no interior: city, family, sporty, robusty. Opcionais como AC, tecto, navegação, mais airbags aumenta tempos.
10D	Direita	Testes eléctricos no motor.	64% Manuais 36% Automáticas	Ordem crescente para testes eléctricos no motor: city, family, sporty, robusty.
Estação 11				
11C	Centro	Configuração da navegação.	23% Manuais 77% Automáticas	Não tem processo no city. O sporty é mais simples que os restantes dois.
Estação 12				
12E	Esquerda	Colocação do tecto de abrir e barra esquerda do tejadilho. Pega na capota do Sporty em simultâneo com o colega e coloca	100% Manuais	Carros com tecto : Maior no Robusty que no Family. Barras do tecto : Maior no Robusty que no city Capota rígida mais demora que a lona.
12D	Direita	Colocação da barra direita do tejadilho. Pega na capota do Sporty em simultâneo com o colega e coloca	100% Manuais	Barras do tecto : Maior no Robusty que no city Capota rígida mais demora que a lona.
Estação 13				
13E	Esquerda	Aperto das barras do tejadilho e da capota (lado esquerdo)	18% Manuais 82% Ferramentas Automáticas	Capota de lona 6 apertos e rígida apenas 3. Apenas em modelos com barras do tecto: Maior no Robusty (4 apertos) que no city (2 apertos)
13D	Direita	Aperto das barras do tejadilho e da capota (lado direito)	18% Manuais 82% Ferramentas Automáticas	Capota de lona 6 apertos e rígida apenas 3. Apenas em modelos com barras do tecto: Maior no Robusty (4 apertos) que no city (2 apertos)
Estação 14				
14E	Esquerda	Colocação e posicionamento das portas do lado esquerdo.	100% Manuais	Complexidade de operações aumenta na seguinte ordem : Sporty, City 3P, City 5P, Family, Robusty.
14D	Direita	Colocação e posicionamento das portas do lado direito.	100% Manuais	Complexidade de operações aumenta na seguinte ordem : Sporty, City 3P, City 5P, Family,

Estudo e teste das sequências de modelos em linhas mistas de montagem

				Robusty.
Estação 15				
15E	Esquerda	Apertos relativos às portas do lado esquerdo.	26% Manuais 74% Ferramentas Automáticas	Complexidade de operações aumenta na seguinte ordem : Sporty, City 3P, City 5P, Family, Robusty.
15D	Direita	Apertos relativos às portas do lado direito.	26% Manuais 74% Ferramentas Automática	Complexidade de operações aumenta na seguinte ordem : Sporty, City 3P, City 5P, Family, Robusty.

Tabela 60 - Procura para cada versão no teste 2.

Nº	Modelo	Procura	Peso	Procura	Peso
1	Robusty 3.1D Top7	4	2%	38	17%
2	Robusty 3.1D Open7	8	4%		
3	Robusty 3.1D Open5	13	6%		
4	Robusty 6.0D Luxe7	3	1%		
5	Robusty 2.4i High5	3	1%		
6	Robusty 2.4i Low5	7	3%		
7	Sporty 1.8ti Sun	9	4%	16	7%
8	Sporty 1.8ti Sun+	5	2%		
9	Sporty 3.6ti Cool	2	1%		
10	Family 1.6i Confort	12	5%	68	31%
11	Family 1.6i Navi	7	3%		
12	Family 1.7d Basic	22	10%		
13	Family 1.7d Trendy	13	6%		
14	Family 2.5d Top	9	4%		
15	Family 2.5d Lux	5	2%		
16	City 1.0i Base	9	4%	98	45%
17	City 1.2i Beet	6	3%		
18	City 1.2i Safe	4	2%		
19	City 1.3d Live	12	5%		
20	City 1.3d Best	10	5%		
21	City 1.0i Base5	9	4%		
22	City 1.2i Beet5	15	7%		
23	City 1.2i Safe5	4	2%		
24	City 1.3d Live5	23	10%		
25	City 1.3d Best5	6	3%		
<u>Total</u>		220	100%	220	100%

Estudo e teste das sequências de modelos em linhas mistas de montagem

Tabela 61 - Cargas e tempos de process. para cada versão e posto de trabalho (teste 2).

Modelos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Postos de Trabalho	1F	101%	101%	101%	112%	91%	91%	83%	83%	102%	76%	73%	88%	88%	93%	93%	71%	74%	78%	79%	83%	71%	74%	78%	79%	83%
		132	132	132	147	119	119	109	109	134	100	95	115	115	122	122	93	97	102	104	109	93	97	102	104	109
	2DF	111%	111%	111%	127%	102%	102%	94%	94%	118%	85%	85%	89%	89%	97%	97%	74%	79%	79%	80%	80%	74%	79%	79%	80%	80%
		146	146	146	166	134	134	122	122	154	111	111	117	117	127	127	97	104	104	105	105	97	104	104	105	105
	2EF	122%	122%	122%	139%	113%	113%	97%	97%	122%	93%	93%	98%	98%	106%	106%	76%	82%	82%	83%	83%	76%	82%	82%	83%	83%
		160	160	160	182	147	147	127	127	159	122	122	128	128	139	139	100	107	107	109	109	100	107	107	109	109
	3D	125%	125%	125%	140%	97%	97%	68%	68%	136%	69%	69%	73%	73%	107%	107%	56%	68%	68%	73%	73%	56%	68%	68%	73%	73%
		164	164	164	183	127	127	89	89	179	90	90	96	96	140	140	74	89	89	96	96	74	89	89	96	96
	3E	96%	96%	96%	96%	103%	103%	100%	100%	112%	96%	96%	90%	90%	90%	90%	83%	87%	87%	79%	79%	83%	87%	87%	79%	79%
		125	125	125	125	135	135	131	131	147	125	125	118	118	118	118	108	114	114	104	104	108	114	114	104	104
	4F	121%	121%	121%	121%	106%	106%	89%	89%	103%	95%	95%	110%	110%	114%	114%	84%	84%	84%	96%	96%	84%	84%	84%	96%	96%
		159	159	159	159	138	138	117	117	135	125	125	143	143	150	150	109	109	109	126	126	109	109	109	126	126
	5E	105%	105%	100%	105%	100%	100%	78%	78%	86%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	82%	82%	82%	82%	82%	84%	84%	84%	84%	84%
		138	138	132	138	132	132	102	102	113	122	122	122	122	122	122	107	107	107	107	107	110	110	110	110	110
	5C	109%	109%	105%	109%	105%	105%	81%	81%	89%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	85%	85%	85%	85%	85%	87%	87%	87%	87%	87%
		143	143	137	143	137	137	106	106	117	127	127	127	127	127	127	111	111	111	111	111	114	114	114	114	114
	6C	102%	102%	97%	102%	97%	97%	76%	76%	83%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	79%	79%	79%	79%	79%	81%	81%	81%	81%	81%
		134	134	128	134	128	128	99	99	109	118	118	118	118	118	118	104	104	104	104	104	107	107	107	107	107
	7C	105%	105%	105%	105%	105%	105%	88%	88%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	81%	81%	81%	82%	82%	81%	81%	81%	81%	82%
		138	138	138	138	138	138	115	115	127	128	128	128	128	128	128	106	106	106	106	108	106	106	106	106	108
	8DT	101%	101%	101%	101%	101%	101%	95%	95%	95%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	77%	77%	77%	77%	77%	77%	77%	77%	77%	77%
		132	132	132	132	132	132	125	125	125	115	115	115	115	115	115	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
	9E	98%	98%	98%	98%	98%	98%	86%	86%	92%	92%	90%	92%	92%	92%	92%	82%	82%	87%	82%	87%	82%	82%	87%	82%	87%
		128	128	128	128	128	128	113	113	121	121	118	121	121	121	121	108	108	114	108	114	108	108	114	108	114
	10E	105%	102%	102%	105%	105%	93%	95%	104%	108%	94%	93%	94%	100%	97%	100%	79%	79%	82%	79%	82%	79%	79%	82%	79%	82%
		137	133	133	137	137	121	125	136	141	122	122	123	132	127	132	104	104	108	104	108	104	104	108	104	108
	10D	96%	96%	96%	96%	96%	96%	94%	94%	97%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	79%	79%	79%	79%	79%	79%	79%	79%	79%	79%
		125	125	125	125	125	125	122	122	127	118	118	118	118	118	118	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104
	11C	114%	0%	0%	114%	114%	0%	0%	97%	97%	0%	114%	0%	114%	114%	114%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		150	0	0	150	150	0	0	127	127	0	150	0	150	150	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12E	100%	100%	100%	100%	100%	88%	116%	124%	124%	0%	0%	0%	87%	0%	87%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
		131	131	131	131	131	115	151	162	162	0	0	0	113	0	113	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
	12D	95%	95%	95%	95%	95%	83%	105%	111%	111%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%
		124	124	124	124	124	108	137	146	146	0	0	0	0	0	0	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	13E	97%	97%	97%	97%	97%	97%	132%	118%	118%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
		128	128	128	128	128	128	173	155	155	0	0	0	0	0	0	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118
	13D	92%	92%	92%	92%	92%	92%	124%	111%	111%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
		120	120	120	120	120	120	163	145	145	0	0	0	0	0	0	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
	14E	102%	102%	102%	102%	102%	102%	86%	86%	86%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	90%	90%	90%	90%	90%	95%	95%	95%	95%	95%
		134	134	134	134	134	134	112	112	112	128	128	128	128	128	128	118	118	118	118	118	124	124	124	124	124
	14D	102%	102%	102%	102%	102%	102%	85%	85%	85%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	90%	90%	90%	90%	90%	94%	94%	94%	94%	94%
		133	133	133	133	133	133	112	112	112	128	128	128	128	128	128	118	118	118	118	118	123	123	123	123	123
	15E	103%	103%	103%	103%	103%	103%	88%	88%	88%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	91%	91%	91%	91%	91%	93%	93%	93%	93%	93%
		136	136	136	136	136	136	115	115	115	126	126	126	126	126	126	119	119	119	119	119	122	122	122	122	122
	15D	101%	101%	101%	101%	101%	101%	86%	86%	86%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	89%	89%	89%	89%	89%	91%	91%	91%	91%	91%
		133	133	133	133	133	133	112	112	112	123	123	123	123	123	123	116	116	116	116	116	119	119	119	119	119

Tabela 62 - Dados relativos às paragens para cada posto de trabalho (teste 2 - 1ª sequência)

Posto de Trabalho	Carga Média	Nº Paragens	Tempo paragens (seg)	Tipo de Paragens							
				Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4	
				Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo
Estação 1											
1F	84%	3	11	0	0	0	0	0	0	3	11
Estação 2											
2DF	89%	68	803	30	532	0	0	0	0	38	271
2EF	95%	75	940	0	0	0	0	0	0	75	940
Estação 3											
3D	81%	34	355	0	0	0	0	0	0	34	355
3E	89%	9	27	0	0	0	0	0	0	9	27
Estação 4											
4F	100%	116	1250	0	0	0	0	0	0	116	1250
Estação 5											
5E	89%	13	40	0	0	0	0	0	0	13	40
5C	93%	36	191	0	0	0	0	0	0	36	191
Estação 6											
6C	87%	15	48	0	0	15	48	0	0	0	0
Estação 7											
7C	91%	28	149	0	0	0	0	0	0	28	149
Estação 8											
8DT	86%	5	15	0	0	0	0	0	0	5	15
Estação 9											
9E	89%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estação 10											
10E	90%	41	156	0	0	0	0	0	0	41	156
10D	87%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estação 11											
11C	26%	10	184	0	0	0	0	0	0	10	184
Estação 12											
12E	61%	10	107	0	0	0	0	0	0	10	107
12D	63%	11	37	0	0	0	0	0	0	11	37
Estação 13											
13E	66%	35	777	0	0	16	549	0	0	19	228
13D	62%	30	473	0	0	16	389	0	0	14	84
Estação 14											
14E	95%	83	250	0	0	38	122	0	0	45	128
14D	95%	83	201	0	0	38	84	0	0	45	117
Estação 15											
15E	95%	51	140	0	0	0	0	0	0	51	140
15D	93%	16	38	0	0	0	0	0	0	16	38

Tabela 63 - Tempos de processamento, cargas e ordem de cargas para o posto 4F.

Posto de Trabalho 4F					
Nº	Modelo	Tempo de Processamento	Carga de Trabalho	Ordem de Carga	Procura
1	Robusty Top7	159	121%	1	4
2	Robusty Open7	159	121%	2	8
3	Robusty Open5	159	121%	3	13
4	Robusty Luxe7	159	121%	4	3
14	Family Top	149	114%	5	9
15	Family Lux	149	114%	6	5
12	Family Basic	143	109%	7	22
13	Family Trendy	143	109%	8	13
5	Robusty High5	138	105%	9	3
6	Robusty Low5	138	105%	10	7
9	Sporty Cool	135	103%	11	2
19	City Live	126	96%	12	12
20	City Best	126	96%	13	10
24	City Live5	126	96%	14	23
25	City Best5	126	96%	15	6
10	Family Confort	125	95%	16	12
11	Family Navi	125	95%	17	7
7	Sporty Sun	117	89%	18	9
8	Sporty Sun+	117	89%	19	5
16	City Base	109	83%	20	9
17	City Beet	109	83%	21	6
18	City Safe	109	83%	22	4
21	City Base5	109	83%	23	9
22	City Beet5	109	83%	24	15
23	City Safe5	109	83%	25	4

Tabela 64 - Dados relativos às paragens para cada posto de trabalho (teste 2 - 2ª sequência)

Posto de Trabalho	Carga Média	Nº Paragens	Tempo paragens (seg)	Sequência 1		Sequência 1		Comparação	
				Tipo 4					
				Nº	Tempo	Nº	Tempo	Nº	Tempo
Estação 1									
1F	84%	3	11	3	11	0	0	-3	-100%
Estação 2									
2DF	89%	68	803	38	271	6	24	-32	-91%
2EF	95%	75	940	75	940	45	302	-30	-68%
Estação 3									
3D	81%	34	355	34	355	0	0	-34	-100%
3E	89%	9	27	9	27	28	52	19	93%
Estação 4									
4F	100%	116	1250	116	1250	195	732	79	-41%
Estação 5									
5E	89%	13	40	13	40	0	0	-13	-100%
5C	93%	36	191	36	191	8	32	-28	-83%
Estação 6									
6C	87%	15	48	0	0	0	0	0	0%
Estação 7									
7C	91%	28	149	28	149	35	59	7	-60%
Estação 8									
8DT	86%	5	15	5	15	0	0	-5	-100%
Estação 9									
9E	89%	0	0	0	0	0	0	0	0%
Estação 10									
10E	90%	41	156	41	156	16	47	-25	-70%
10D	87%	0	0	0	0	0	0	0	0%
Estação 11									
11C	26%	10	184	10	184	1	24	-9	-87%
Estação 12									
12E	61%	10	107	10	107	0	0	-10	-100%
12D	63%	11	37	11	37	0	0	-11	-100%
Estação 13									
13E	66%	35	777	19	228	0	0	-19	-100%
13D	62%	30	473	14	84	0	0	-14	-100%
Estação 14									
14E	95%	83	250	45	128	35	51	-10	-60%
14D	95%	83	201	45	117	35	51	-10	-56%
Estação 15									
15E	95%	51	140	51	140	8	24	-43	-83%
15D	93%	16	38	16	38	0	0	-16	-100%